



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

ERSATZ VON PNEUMATISCHEN UND HYDRAULISCHEN ANTRIEBEN DURCH ELEKTROANTRIEBE

POTENTIALANALYSE

Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

Dr. Stefan Berchten, BEngineering

Hardstrasse 20, 8303 Bassersdorf, berchten@hotmail.com, www.bengineers.ch

Christoph Ritz, Schnyder Ingenieure AG

Mutzenstrasse 9b, 3940 Steg, christoph.ritz@sing.ch, www.schnyderingenieure.ch

Impressum

Datum: 30. Dezember 2006

Im Auftrag des Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Elektrizität

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

www.bfe.admin.ch

BFE-Projektbegleiter: felix.frey@bfe.admin.ch

Projekt- / Vertragsnummer: 101380/151641

Bezugsort der Publikation: www.energieforschung.ch und www.electricity-research.ch

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
Résumé.....	6
Abstract.....	7
1. Ausgangslage	8
1.1. Antriebssysteme mit Pneumatik und Hydraulik.....	8
1.2. Aktueller Einsatz von Druckluftsystemen in Industriebetrieben	8
1.3. Ersatz von pneumatischen/ hydraulischen Antrieben durch elektromechanische Antriebe	8
1.4. Integration von Industriepartnern	9
2. Vorgehen	9
2.1. Gruppierung und Auswahl der Anlagen in energieintensiven Industriebetrieben	9
2.2. Ermittlung des Potentials zur Energieeinsparung	9
2.3. Sensibilisierungsgrundlagen erarbeiten	9
2.4. Ausgeführte Projektaktivitäten.....	9
3. Ziel der Arbeit.....	10
4. Grundlagen zu Druckluftsystemen.....	11
4.1. Druckluftsysteme/Pneumatiksysteme	11
4.2. Druck- und Volumenstromerzeugung	11
4.3. Druckluftverteilung.....	13
4.4. Steuerung	13
4.5. Antriebe/Aktorik	13
4.6. Energetische Verluste im Druckluftsystem.....	15
5. Untersuchungsobjekte	16
5.1. Metallherstellende Industrie	16
5.2. Chemische Industrie.....	16
5.3. Nahrungsmittelindustrie.....	17
5.4. Verpackungsindustrie.....	17
5.5. Allgemeine Vorgehensweise	17
6. Anlagenkategorisierung und Ergebnisse der Analysen.....	17
6.1. Aufteilung der Aktorenanteile in lineare Bewegungen und Drehbewegungen.....	18
6.2. Bedarf an elektrischer Energie für die Druckluftverdichtung	18
6.3. Energieverluste im Pneumatiksystem	19
6.4. Verluste im elektromechanischen System	19
6.5. Energieeinsparpotenzial.....	21
6.6. Hochrechnung der Einsparpotentiale für die schweizerische Industrielandschaft.....	21
7. Projektbeispiele zur Nutzung des Sparpotentials in Druckluftsystemen	25
7.1. Lebenskostenvergleich Druckluftaktor / elektromechanischer Aktor Handling	25
7.2. Ersatz pneumatischer Antriebe einer Glasproduktionsmaschine - Beispiel 1	26
7.3. Ersatz pneumatischer Krustenbrechereinheit in einer Metallschmelze– Beispiel 2.....	27
7.4. Ersatz eines pneumatischen durch ein elektromechanisches Regelventil – Beispiel 3	30
7.5. Ersatz eines pneumatischen durch einen elektromechanischen Zylinder – Beispiel 4	32

8.	Grundlagen zu Hydrauliksystemen.....	35
8.1.	Hydrauliksysteme	35
8.2.	Druck- und Volumenstromerzeugung	35
8.3.	Steuerung	35
8.4.	Antriebe/Aktorik	35
8.5.	Energetische Verluste im Hydrauliksystem.....	36
9.	Untersuchungsobjekte	36
9.1.	Metallerzeugende Industrie	36
9.2.	Pharmazeutische Industrie.....	36
9.3.	Allgemeine Vorgehensweise	37
10.	Untersuchungsergebnis	38
10.1.	Grundlagendaten.....	38
10.2.	Energieverluste im Hydrauliksystem	38
10.3.	Verluste im elektromechanischen System	39
10.4.	Energieeinsparpotential	40
10.5.	Hochrechnung der Einsparpotentiale für die schweizerische Industrielandschaft.....	40
11.	Schlussfolgerungen	41
12.	Referenzen	41

Zusammenfassung

Der Fortschritt der Technik und neue Antriebskonzepte wie der Linearmotor oder Torquemotoren in Kombination mit moderner Halbleiterelektronik sowie hocheffiziente mechanische Getriebe lassen es zu, hydraulische und pneumatische Antriebe in vielen Anwendungsfällen wirtschaftlich zu ersetzen. Dadurch kann der Energiebedarf von Antriebssystemen bis zu 90% reduziert werden. Weitere Vorteile beim Einsatz von elektromechanischen Systemen anstelle von Druckluft- oder Hydrauliksystemen ergeben sich im Betrieb und Unterhalt, da die Substitutionsprodukte nicht auf teure, zentrale Infrastruktur wie etwa einer Druckluftherzeugungsanlage angewiesen sind und im Normalfall ein minimales Mass an Unterhalt benötigen.

Anhand bestehender Anlagen in Industriebetrieben wird eine Potentialabschätzung durchgeführt, die aufzeigt, welche Energiemengen im Falle einer direkten Umwandlung der elektrischen Energie in kinetische Energie mittels elektromechanischer Systeme eingespart werden können. Ziel ist, das Energieeinsparpotential beim Einsatz von modernen Technologien aufzuzeigen und potentielle Projektpartner für gute Beispiele im Sinne von Referenzanlagen zu identifizieren und diese bezüglich Life Cycle Costs zu sensibilisieren. Zur Förderung des Verständnisses werden einige Grundlagen von Druckluftsystemen erläutert. Insbesondere wird die Kinematik von Druckluftzylindern, welche den Hauptanteil an pneumatischen Aktoren ausmachen, untersucht, und das energetische Verhalten einer Gesamtanlage beschrieben.

Anhand konkreter Beispiele wird für eine weitere Sensibilisierung der Anwender die Rentabilität unter Einbezug der Anlagenlebensdauer, der Investitions- und Betriebskosten für die Szenarien „Neubau“ und „Retrofit“ ermittelt. Aspekte wie Lärm, Lüftung, Kühlung und Steuerungsaufwand werden in die Analyse miteinbezogen. Die Ergebnisse der Analyse von Anlagen und Systemen belegen, dass sich der finanzielle Mehraufwand bei einer Investition, welcher durch die Verwendung von elektromechanischen Systemen entsteht, aufgrund der Einsparungen an Energiekosten innerhalb eines Zeitraums von wenigen Monaten bis 3 Jahre amortisieren lässt.

Analog den Untersuchungen betreffend pneumatische Anlagen, wurde für zwei der vier untersuchten Industriebetriebe eine energetische Analyse in Bezug auf die installierten Hydraulikanlagen durchgeführt.

Mittels Hochrechnung wird das Einsparpotential an elektrischer Energie für die Schweizerische Industrielandschaft, für den Fall des Ersatzes resp. der Elimination aller existierenden, industriell genutzten Druckluftanlagen abgeschätzt.

Die Hochrechnung ergibt im Fall der Substitution der pneumatischen Anlagen eine Einsparung von 4% des Endverbrauchs „Industrie und verarbeitendes Gewerbe“ der sich auf 18'898 GWh beläuft.

Der Umbau der hydraulischen Anlagen ergibt ein Einsparpotential von 0.7% der 18'898 GWh.

Die kostenverantwortlichen Stellen in den Industrie- und Gewerbebetrieben sind aufgrund der Resultate der Potentialanalyse betreffend Vollkostenrechnung (Betriebskosten/Lebenskosten) von Druckluft- und Hydraulikanlagen zu sensibilisieren. Durch den minimalen Einsatz oder den absoluten Verzicht auf Druckluft beim Engineering, Design und der Planung neuer Anlagen und Installationen kann ein kontinuierlicher Abbau der installierten Druckluftleistung angestrebt werden. Die Voraussetzung eines gewissen Maßes an Kreativität seitens der Konstrukteure, Anlagen- und Maschinenbauer, Planer und Ingenieurbüros ist hier unabdingbar.

Die Projektarbeiten erfolgten in Zusammenarbeit mit den Unternehmen **Lonza, Alcan, Vetropack, Novartis und Nespresso**.

Résumé

Le progrès de la technologie et des nouveaux concepts de commande, comme le moteur linéaire ou les moteurs torques en combinaison avec une électronique de semi-conducteur moderne ainsi que des boîtes de vitesses mécaniques (switches) très efficaces, permettent de remplacer économiquement des commandes hydrauliques et pneumatiques dans beaucoup de cas. De cette manière les besoins en énergie des systèmes de commandes peuvent être réduits jusqu'à 90%. D'autres avantages peuvent être réalisés pendant l'opération et l'entretien en appliquant des systèmes électromécaniques à la place de systèmes hydrauliques ou d'air comprimé, puisque les produits de substitution ne dépendent pas d'une infrastructure coûteuse et centrale comme par exemple une machine de production d'air comprimé qui nécessite normalement un minimum d'entretien.

Basé sur les installations existantes dans l'industrie une évaluation du potentiel est mis en œuvre qui montre les économies d'énergie qui peuvent être effectuées dans le cas d'une conversion directe de l'énergie électrique en énergie cinétique avec des moyens de systèmes électromécaniques. Le but de ce projet est de préciser le potentiel d'économie d'énergie en appliquant des technologies modernes et d'identifier des associés potentiels comme exemple d'installations de référence et de les sensibiliser en ce qui concerne les coûts du cycle de vie (Life Cycle Costs). Pour stimuler la compréhension quelques bases des systèmes à air comprimé sont expliquées. La cinématique des cylindres à air comprimé qui constituent la majeure partie des acteurs pneumatiques, est examinée en particulier et le comportement énergétique de l'installation complète est décrite.

Au moyen d'exemples concrets les utilisateurs et les décideurs sont rendus attentifs à la rentabilité économique en prenant en considération la durée de vie de l'installation, les frais d'investissement et d'exploitation pour le scénario d'un «nouveau système» et d'une «modification du système existant». Des aspects comme le bruit, l'aération, le refroidissement et les dépenses de commande sont également inclus dans l'analyse. Les résultats de l'analyse des installations et des systèmes prouvent que le surcroît de dépenses financier pour des systèmes électromécaniques peut être amorti avec l'économie d'énergie en une période de quelques mois à 3 ans.

Analogue aux études concernant les installations pneumatiques, pour deux des quatre usines évaluées, une analyse énergétique concernant les installations hydrauliques a été effectuée.

Au moyen d'une extrapolation le potentiel d'économie en énergie primaire est estimé pour le marché Suisse de l'électricité, assument une substitution complète de toutes les installations d'air comprimés.

Cela donne une économie de 4% de la consommation annuelle totale dans l'industrie qui s'élève à 18'898 GWh.

La substitution de systèmes hydrauliques donnent un résultat d'épargne de 0.7% de la consommation totale de l'industrie Suisse.

Les responsables des dépenses et les ingénieurs des projets dans l'industrie doivent être informés sur les conséquences économiques provoquées par l'usage d'air comprimé et des systèmes hydrauliques. Une réduction continu de la puissance de compresseur installé est faisable en remplaçant les acteurs hydrauliques et pneumatiques par des commandes électriques. Un certain degré de créativité et de savoir technologique est indispensable pour le succès.

Ce projet a été réalisé en collaboration avec les compagnies **Lonza, Alcan, Vetropack, Novartis et Nespresso**.

Abstract

The engineering progress and new drive concepts such as linear motor or torque motors supported by modern semiconductor switches and high efficient gears allow for energy and cost effective replacements of hydraulic and pneumatic drives in many cases. The energy consumption of these drive systems can be significantly reduced with savings up to 90%. Additional advantages can be achieved for operation and maintenance. Centralized and cost intensive installations such as compressors, coolers, air treatment etc. are not needed anymore.

Based on existing installations in industry an estimation of the saving potential is presented. It shows the large energy savings that can be achieved with direct conversion of the electrical into mechanical energy. The goal of this project is to demonstrate the energy savings potential with the application of modern drive technologies. It further aims to identify industry partners that can be referenced as „best practices“ as well as to sensitize to the Life Cycle Costs aspects. To stimulate the understanding some key issues of compressed air systems are explained. Special emphasis is given on the kinematics of compressed air cylinders that play an important role as pneumatic actors. In addition the energetic behaviour of the whole system is investigated.

Using real world examples end-users and decision makers are made attentive to the economic profitability taking into account the investment, the operating cost and the system life cycle for both scenarios „purchase of a new system“ and „retrofit of an existing one“. Aspects such as noise, ventilation, cooling and control are also included in the analysis. The results for different installations and systems demonstrate, that the extra cost for electro-mechanical systems are paid back by the savings of energy within a few months up to 3 years.

Likewise to the investigations of the pneumatic installations for two of the four industrial plants an energy efficiency assessment has been conducted for oil hydraulic systems as well.

By means of an extrapolation the saving potential for the Swiss electricity market assuming a complete substitution of all compressed air installations is estimated. It gives a saving of 4% of the total yearly consumption in the industry which amounts 18'898 GWh.

The substitution of hydraulic systems results in savings of 0.7% of the total Swiss industry consumption.

Decision makers and project engineers of industry plants must be informed about the economic consequences caused by the usage of compressed air and hydraulic systems. Striving for a continuous reduction of installed compressor power is feasible by replacing hydraulic and pneumatic actors with electrical drives. A certain degree of creativity and engineering initiative is a paramount success factor.

This project has been realized in collaboration with the companies **Lonza, Alcan, Vetropack, Novartis** and **Nespresso**.

1. Ausgangslage

1.1. Antriebssysteme mit Pneumatik und Hydraulik

Zur Bewältigung unterschiedlicher Aufgaben von Antrieben kann es sinnvoll sein, pneumatische oder hydraulische Systeme einzusetzen, da jedes dieser Systeme spezifische Vor- und Nachteile aufweist.

Pneumatik ist die technische Anwendung der Druckluft. Mittels Druckluft werden z.B. Werkzeuge in der Fertigung und Montage angetrieben, Industrieanlagen gesteuert, Fertigungseinrichtungen überwacht und Automaten betrieben. Unter Hydraulik werden alle Antriebs-, Steuer- und Regelbauteile einer Maschine zusammengefasst, mit denen durch den Druck in einer Flüssigkeit Kräfte erzeugt und übertragen werden.

Bei beiden oben erwähnten Techniken wird primär mittels eines Verdichters Druck in einem Medium erzeugt. Der Verdichter - Kompressor oder Pumpe - wird seinerseits wiederum von einem Elektromotor angetrieben. Bei diesen Systemen wird die elektrische Energie also indirekt in mechanische Bewegungen umgesetzt, was sich in einem niedrigeren Wirkungsgrad niederschlägt.

1.2. Aktueller Einsatz von Druckluftsystemen in Industriebetrieben

Obwohl Untersuchungen zeigen, dass Druckluftanlagen einen schlechten Gesamtwirkungsgrad aufweisen, gehören diese in den meisten Industrie- und Gewerbebetrieben zur Standardausrüstung. Der technologische Fortschritt erlaubt heute, beinahe jeden pneumatischen Aktor durch einen Aktor mit direktem Elektroantrieb zu ersetzen. Damit würden die in einem Druckluftsystem entstehenden Verluste gemäss [1] und [13] um rund 76% verkleinert.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wird untersucht, welche Menge an elektrischer Energie bei ausgewählten Betrieben unterschiedlicher Industriezweige eingespart werden kann, falls die installierten Druckluftanlagen eliminiert und alle pneumatischen Aktoren durch Aktoren mit direkten Elektroantrieben ersetzt werden. Auf der Basis von [1] wird eine Abschätzung des Einsparpotentials über die untersuchten Branchen sowie über die Schweizweit installierte Druckluftleistung gemacht.

Da die benötigten Druckluftmengen zum Zeitpunkt der Projektierung einer Anlage in den meisten Fällen nicht bekannt sind, werden die Kompressoranlagen stark überdimensioniert. Dies führt zu einer geringen Ausnutzung der Anlagen. Damit geht eine Erhöhung der Ein- und Ausschaltzyklen einher, was sich negativ auf den Anlagenwirkungsgrad auswirkt. Ein beträchtlicher Anteil der durch die Kompressionsmaschine geleisteten Arbeit wird nicht in Druckenergie, sondern in Wärme umgewandelt. Die Investitionskosten, welche zur Rückgewinnung der Kompressionswärme getätigt werden müssten, schrecken zudem die Mehrheit der Unternehmen davor ab, einen entsprechenden Installationsaufwand auf sich zu nehmen.

Unter den Endnutzern herrscht zudem sehr oft eine falsche Meinung im Bezug auf den monetären Wert der komprimierten Luft, denn „es gibt sie ja überall“, also ist sie doch „gratis“. Lecks in den Verteilnetzen werden daher nicht selten ignoriert oder die Druckluft wird zu Kühl- oder Reinigungszwecken eingesetzt.

1.3. Ersatz von pneumatischen/ hydraulischen Antrieben durch elektromechanische Antriebe

Neue Antriebskonzepte wie Linearmotoren oder Transversalflussmotoren lassen es zu, bestehende Antriebe, insbesondere hydraulische und pneumatische, wesentlich energieeffizienter und langlebiger zu realisieren. Aufgrund der Tatsache, dass mit den neuen Technologien einerseits weitere prozessorientierte Vorteile verfügbar werden und andererseits auch oftmals die Wirtschaftlichkeit gegeben ist, ist in diesem Bereich der Markt bereits aktiv geworden.

Im Sinne von flankierenden Massnahmen ist eine entsprechende energieorientierte Sensibilisierung wie zum Beispiel das Aufzeigen des Potenzials der Energieeinsparungen oder die Lebensdauerkosten von Aktorsystemen und gute Beispiele in verschiedenen Industriebereichen nützlich.

1.4. Integration von Industriepartnern

Die Projektarbeiten erfolgten in Zusammenarbeit mit den Unternehmen Lonza, Alcan, Vetropack Novartis und Nespresso.

2. Vorgehen

Das Vorgehen für die Durchführung der vorliegenden Potenzialabschätzung gliedert sich in die zwei Phasen:

- der Bestandesaufnahme von bestehenden Anlagen und
- der Abschätzung des Einsparpotenzials beim Ersatz, bzw. der Vermeidung der pneumatisch/hydraulisch-mechanischen Energieumwandlung.

2.1. Gruppierung und Auswahl der Anlagen in energieintensiven Industriebetrieben

In einer ersten Phase sind verschiedene, stichprobenartig ausgewählte Industriebetriebe der Branchen Alu-, Glasherstellung, Chemie und Verpackung auf die Verwendung von pneumatischen und hydraulischen Anlagen analysiert worden. Die bestehenden Anlagen wurden aufgenommen und anhand der verwendeten bzw. umgesetzten Energien kategorisiert.

Anschliessend erfolgte die Analyse, bei welchen Anlagen die pneumatischen, bzw. hydraulischen Aktoren durch Elektroantriebe ersetzt werden könnten. Neben der Erarbeitung von Berechnungsgrundlagen war die Zusammenarbeit mit den Betreibern, insbesondere was die Untersuchung der technisch/betrieblichen Machbarkeit betrifft, erforderlich.

2.2. Ermittlung des Potentials zur Energieeinsparung

Da bei pneumatischen oder hydraulischen Systemen die elektrische Energie über einen Elektromotor und einen Verdichter zuerst in Druckenergie umgewandelt und anschliessend in einem Aktor in Bewegung transformiert wird, sind bei diesen Systemen naturgemäss höhere Verluste zu erwarten, als wenn die elektrische Energie mittels Frequenzumrichter und eines Elektromotors direkt in Bewegung umgesetzt wird.

Unter Berücksichtigung der Verluste zur Umsetzung der elektrischen Energie in mechanische Bewegung kann das theoretisch mögliche energetische Einsparpotential ermittelt werden. Hierfür ist die Beschaffung von technischen Spezifikationen und Grundlagendaten für die relevanten Anlagen notwendig.

Diese Kenntnisse erlauben die Abschätzung, wie hoch das Potential für Einsparungen bei den Erstellungskosten für eine Anlage und einen allfälligen Retrofit ist.

2.3. Sensibilisierungsgrundlagen erarbeiten

Für Anlagen mit hohem Potential wird für eine weitere Sensibilisierung die Rentabilität unter Einbezug der Anlagenlebensdauer, Investitions- und Betriebskostenabschätzungen im Fall von Neubau oder bei Retrofit ermittelt. Weiter werden Aspekte wie Lärm, Lüftung, Kühlung und Steuerungsaufwand in die Analyse miteinbezogen.

2.4. Ausgeführte Projektaktivitäten

Die folgenden Aktivitäten sind im Rahmen der Projektaktivitäten ausgeführt worden:

- Gruppierung und Auswahl der Anlagen
- Aufnahme und Katalogisierung von Anlagen in den Industriebetrieben.

- Untersuchung zur technischen Machbarkeit an den relevanten Anlagen
- Erarbeitung von Berechnungsgrundlagen
- Ermitteln des Potentials zur Energieeinsparung
- Beschaffung von technischen Spezifikationen und Grundlagendaten für die relevanten Anlagen.
- Ermittlung der energetischen Einsparpotentiale für die Anlagen

3. Ziel der Arbeit

Ziel ist, das Energieeinsparpotential mit modernen Technologien aufzuzeigen und potentielle Projektpartner für gute Beispiele im Sinne von Referenzanlagen zu identifizieren und zu sensibilisieren.

Um mutmassliche Einsparpotentiale inklusive marktwirtschaftliche und funktionstechnische Überlegungen abschätzen zu können, sollen in einer Sensibilisierungsphase entsprechende Grundlagen erarbeitet werden.

Anhand von bestehenden Anlagen in Industriebetrieben wird eine Potentialabschätzung gemacht, welche Energiequanten im Falle einer direkten Umwandlung der elektrischen Energie in Bewegungsenergie eingespart werden können.

Eine Hochrechnung soll das Einsparpotential in der Schweizerischen Industrielandschaft aufzeigen.

4. Grundlagen zu Druckluftsystemen

4.1. Druckluftsysteme/Pneumatiksysteme

Das Wort Pneumatik stammt vom Griechischen 'pneuma' und bedeutet soviel wie "Wind" oder "Atem". Es bezeichnet den Einsatz von Druckluft in Wissenschaft und Technik. Industriell wird Druckluft als Energieträger in den Industrieländern seit etwa Anfang des 20. Jahrhunderts zum Antrieb von Hämmerm und Bohrern angewandt, seit etwa 1960 spielt sie in der Steuerungs- und Automatisierungstechnik eine bedeutende Rolle.

Druckluft - veraltet: Pressluft - wird durch Verdichten der Umgebungsluft in Kompressoren erzeugt. Sie kann zum Antrieb von Druckluftmotoren in Werkzeugen wie z.B. Druckluflthämmern zum Nieten und Druckluftschrauben verwendet werden. In der Steuerungstechnik werden hauptsächlich Linearantriebe in Form von Zylindern eingesetzt, z.B. zum Einspannen und Zuführen von Werkstücken in Bearbeitungszentren oder zum Verschliessen von Verpackungen. Für die Steuerung von Regelventilen in der chemischen Industrie werden vorwiegend pneumatische Ventile eingesetzt.

In der Industrie und im Handwerk hat sich die Druckluft als Energieträger etabliert. In fast allen Branchen des produzierenden und weiterverarbeitenden Gewerbes wird Druckluft mannigfaltig eingesetzt.

Jede pneumatische Anlage besteht aus 4 Teilsystemen:

- Teilsystem zur Druckluftherzeugung
- Teilsystem zur Druckluftverteilung
- Teilsystem zur Steuerung
- Teilsystem zur Arbeitsverrichtung (Antriebe/Aktorik)

4.2. Druck- und Volumenstromerzeugung

Druckluftherzeuger/Verdichter komprimieren die aus der Atmosphäre angesaugte Luft auf einen gewünschten Betriebsdruck. Vorgeschaltete Nass- oder Trockenfilter scheidet Staub und andere angesaugte Festkörper aus der Luft aus. Zur Verdichtung der Luft werden Verdrängerkompressoren und Turboverdichter eingesetzt. In der Abbildung 1 sind die verschiedenen Typen aufgelistet. Die Abbildung 2 zeigt den Einsatzbereich der Typen an.

Verdrängerkompressoren

Kolbenverdichter arbeiten nach dem Verdrängungsprinzip, d.h. die Luft wird aus der Atmosphäre in den Zylinderraum gesaugt, eingeschlossen, komprimiert und in einen Druckbehälter verdrängt

Hubkolbenverdichter

Einstufige Hubkolbenverdichter werden bei Betriebsdrücken bis 10 bar und Liefermengen bis 100 m³/h eingesetzt, wobei die Liefermengen auf den Atmosphärendruck bezogen sind.

Bei dem in der Industrie üblichen Arbeitsdruck von 7 bis 10 bar, auf den die meisten Steuerungen ausgelegt sind, gelangen zweistufige Hubkolbenverdichter mit Zwischenkühlung zum Einsatz. In der Niederdruckstufe verdichten diese die Luft vom Atmosphärendruck auf einen Zwischendruck, der der Quadratwurzel des Verdichterenddrucks entspricht.

Die Zwischenkühlung kann durch Umwälzen von atmosphärischer Luft über die Kühlrippen der Zylinder und des Zwischenkühlers erfolgen. Bei wassergekühlten Verdichtern sind Zylinder und Zwischenkühler in einen Wassermantel gebettet. Bei der Zwischenkühlung wird die in der Niederdruckstufe durch die Komprimierung erwärmte Luft möglichst wieder auf die Eintrittstemperatur abgekühlt, bevor sie der Hochdruckstufe zugeführt wird.

Membranverdichter

Membranverdichter werden zur Klasse der Hubkolbenverdichter gezählt. Es werden Drücke bis zu 10 bar erreicht. Durch die luftdicht eingespannte Membrane kommt die zu komprimierende Luft nicht mit dem Antriebsmechanismus des Verdichters in Berührung. Aus diesem Grund eignet sich der Membranverdichter in besonderem Masse zur Erzeugung von ölfreier Druckluft. Diese findet vornehmlich in der Lebensmittelindustrie ihre Verwendung.

Rotationsverdichter

Diese Aggregate arbeiten geräuscharm und werden ab Betriebsdrücken ab ca. 7 bar zweistufig mit Zwischenkühler gebaut. Wird während dem Verdichtungsprozess Öl in die Zylinderräume eingespritzt, erreichen einstufigen Drehkolbenverdichter Drücke von über 10 bar. Das eingespritzte Öl dient zur Kühlung, Schmierung und Abdichtung der Läufer gegen das Gehäuse.

Bei Liefermengen von 2 bis 15 m³/min ist der öleingespritzte Schraubenverdichter vor allem zur Deckung der Grundlast im Dauerbetrieb dem Kolbenverdichter überlegen. Für den Ausgleich von Lastspitzen und bei häufigen Regelvorgängen wird in diesem Fällen vielfach ein Kolbenverdichter zugeschaltet.

Turbokompressoren

Turboverdichter auch bekannt als Strömungsverdichter, saugen über Schaufelräder oder Propeller die Atmosphärenluft an und beschleunigen diese. In nachgeschalteten Behältern wird die Strömungsenergie der Luft in Druckenergie umgewandelt. Bei diesen dynamisch wirkenden Verdichtern wird zwischen Axialturboverdichtern und Radialturboverdichtern unterschieden.

Turboverdichter werden mit Ausnahme von einfachen Gebläsen und Ventilatoren mehrstufig gebaut. Sie liefern Drücke von bis zu 10 bar und eignen sich für den Einsatz vor allem dort, wo sehr grosse Mengen von Druckluft benötigt werden (über 130 m³/min).

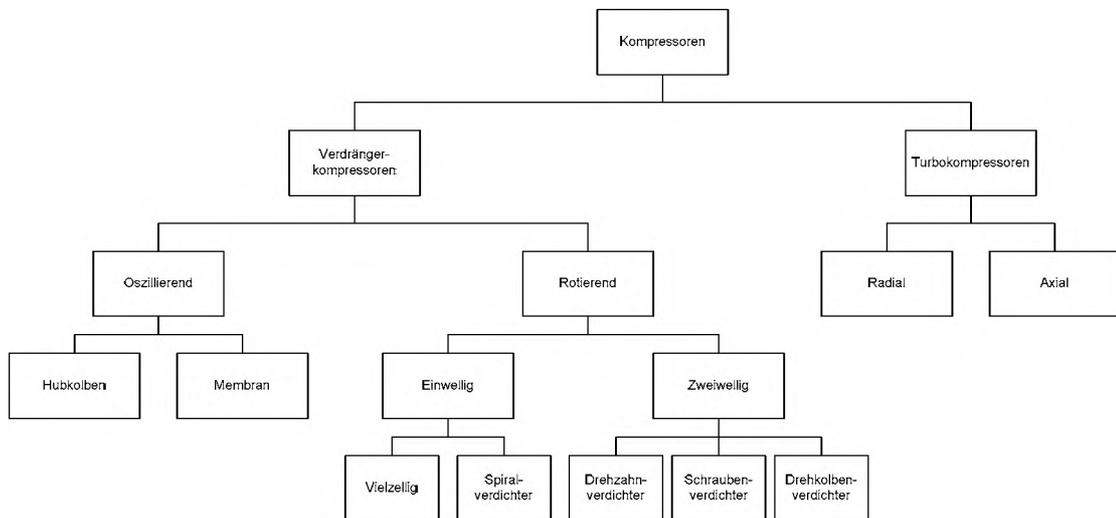


Abbildung 1: Klassifizierung von Druckluftkompressoren [7]

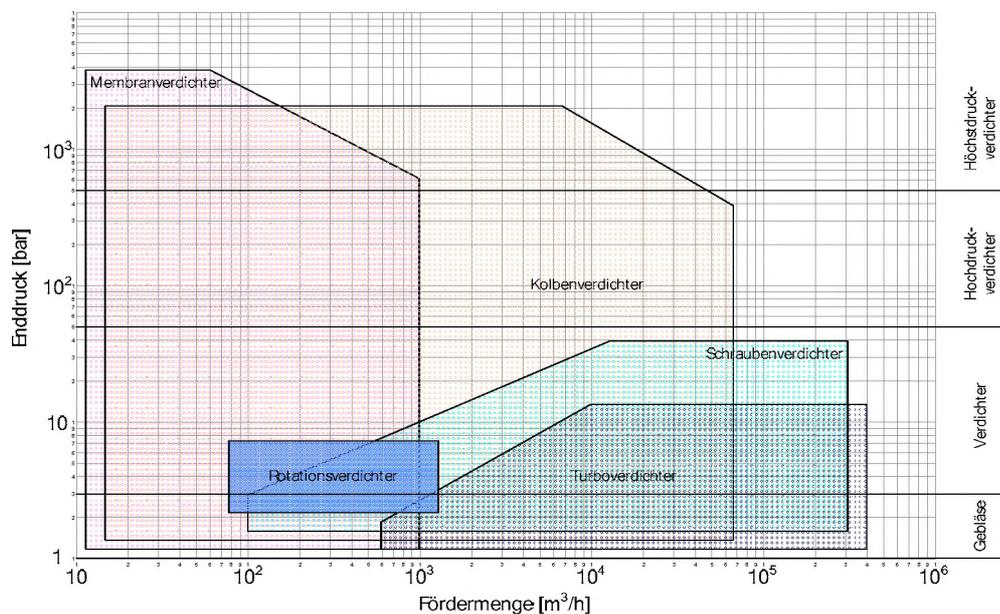


Abbildung 2: Einsatzbereiche der verschiedenen Verdichtertypen [8]

4.3. Druckluftverteilung

In grösseren Betrieben wird Druckluft meistens mittels eines oder mehrerer zentraler Druckluftkompressoren hergestellt. Über Rohrleitungssysteme erfolgt die Druckluftversorgung der einzelnen Gebäude. In den Rohrleitungssystemen sind meist ein oder mehrere Druckluftspeicher in Form von Tanks integriert. Diese dienen vor allem zum Ausgleich von Druck- und Verbrauchsmengenschwankungen bei weit von den Kompressoren entfernten Anlagen.

4.4. Steuerung

Die Steuerung von Antrieben/Aktoren erfolgt meist über Wegeventile, deren Angebot auf dem Markt mannigfaltig ist. Häufig eingesetzt werden Wegeventile, die mit Hilfe von Magnetspulen umgesteuert werden und z.B. einen Zylinder zum Ausfahren/Einfahren bewegen können.

4.5. Antriebe/Aktorik

Die Antriebe und die Aktorik in der Pneumatik sind vielfältig. Mit Hilfe von Druckluft werden Rotations- sowie Linearbewegungen ausgeführt. Dazu kommen vorwiegend Lamellenmotoren und Pneumatikzylinder zum Einsatz. Schwenkantriebe sind eine weitere Art von Aktoren, welche für Rotationsbewegungen bis zu einem Vollkreis benutzt werden. Eine weitere Möglichkeit der Druckluftnutzung besteht darin, pulver- und granulatartige Stoffe zu transportieren [3]. Diese Technik wird vielerorts und in den unterschiedlichsten Branchen eingesetzt. In der chemischen Industrie, sowie im Lebensmittelbereich wird Druckluft häufig zum Betrieb von Regelventilen eingesetzt.

Zylinder

Der Begriff Zylinder ist aus dem Griechischen *kylíndein* abgeleitet und bedeutet soviel wie rollen, wälzen. Per Definition versteht man im technischen Bereich unter dem Ausdruck Zylinder eine röhrenförmige Kammer, in der sich ein Kolben bewegt.

In der Fluidtechnik stellt der Zylinder eine Antriebseinheit für lineare, seltener auch rotierende Bewegungen dar. Die Bewegung des Kolbens wird über die Kolbenstange oder magnetischen Kraftschluss auf den/die zu bewegenden Teile übertragen. Die Kolbenstange muss luftdicht aus dem Hubraum herausgeführt werden. Es wird zwischen einfach- und doppeltwirkenden Zylindern unterschieden.

Die Einsatzbereiche für Zylinder in der Prozesstechnik sind fast unbegrenzt. Überall dort wo lineare Bewegungsabläufe notwendig sind, können Zylinder eingesetzt werden.

Der Energieumsatz in einem Zylinder lässt sich mittels einfacher physikalischer Zusammenhänge bestimmen. Der Energieumsatz entspricht exakt der Arbeit im physikalischen Sinn, welche verrichtet werden muss, um eine Energiemenge von einem System in ein anderes übertragen zu können. Es kann geschrieben werden:

Arbeit ist das Skalarprodukt aus einer Kraft F und einem Weg s und wird in Joule angegeben. Wenn eine Kraft einen Körper um eine Distanz s verschiebt, verrichtet sie Arbeit am Körper, die als Energie in diesem gespeichert oder weitergegeben wird. Energie ermöglicht ihrerseits wieder das Verrichten von Arbeit.

$$W = \vec{F} \circ \vec{s} = |\vec{F}| \cdot |\vec{s}| \cdot \cos(\alpha) \quad (1)$$

Der Kolben kann sich durch die Führung im Zylinder nur in eine bestimmte Richtung bewegen. Es wird angenommen, dass die Druckluft auf dem Kolben ein homogenes, gerichtetes Druckfeld in die einzig mögliche Bewegungsrichtung des Kolbens erzeugt. Dadurch wird der Winkel α gleich 0. Da $\cos(0)$ sich zu 1 ergibt, kann geschrieben werden:

$$W = F \cdot s \quad [J] = [N] \cdot [m] \quad (2)$$

Das Produkt aus der Kolbenfläche A und dem Druck p der im Zylinderraum herrscht, ergibt die Kraft F , welche durch die Kolbenstange ausgeübt wird. Es kann also geschrieben werden:

$$F = p \cdot A \quad [N] = \left[\frac{N}{m^2} \right] \cdot [m^2] \quad (3)$$

Da die Variable s dem Hub des Kolbens entspricht, kann der Energieumsatz von Druckenergie zu Bewegungsenergie im Zylinder für eine Ausfahrbewegung gemäss

$$W = p \cdot A \cdot s \quad [J] = \left[\frac{N}{m^2} \right] \cdot m^2 \cdot m \quad (4)$$

bestimmt werden. Die Energie für einen vollständigen Zyklus schreibt sich als Summe der Energien für eine Ausfahrbewegung und eine Einfahrbewegung, falls es sich um einen Zylinder ohne Feder-rückstellung handelt.

$$W = p \cdot s \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (2 \cdot D^2 - d^2) \quad [J] = \left[\frac{N}{m^2} \right] \cdot [m] \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (2 \cdot [m^2] - [m^2]) \quad (5)$$

Schwenkantrieb

Dieser Typ von Aktor ist in unterschiedlichen Bauweisen auf dem Markt erhältlich. Die meisten basieren auf dem Prinzip, dass sich ein Kolben in einem Zylinder bewegt. Die mit dem Kolben fest verbundene Kolbenstange ist längsverzahnt. Diese Längsverzahnung greift an einem Zahnrad an, welches auf der anzutreibenden Welle montiert ist. Durch das hin- und herbewegen des Kolbens wird die Welle über das Zahnrad in eine Drehbewegung versetzt. Da die Kolbenstange eine begrenzte Länge hat, sind meist Drehbewegungen bis zu einem Vollkreis möglich, dann muss in die Gegenrichtung gedreht werden. Damit ist das Prinzip des Schwenkantriebs beschrieben.

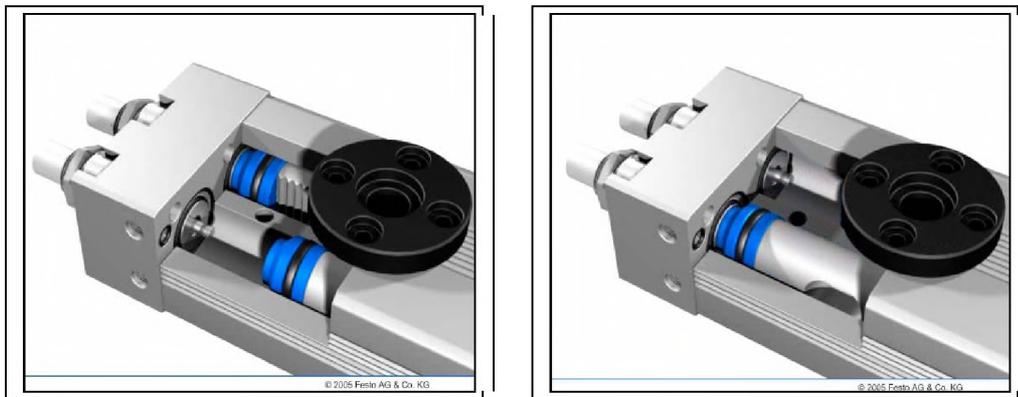


Abbildung 3: Einfach und doppelt wirkende Schwenkantriebe [9]

Schwenkantriebe werden vornehmlich dort eingesetzt, wo Rotationsbewegungen bis zu einem Vollkreis (360°) ausgeführt werden müssen. Mit Hilfe von Schwenkantrieben werden z.B. Kugelhähne in unterschiedlichen Ausführungen oder Klappen angetrieben. Es sind jedoch eine Fülle weiterer Anwendungen denkbar. Es wird zwischen einfach- und doppeltwirkenden Schwenkantrieben unterschieden.

Dieser pneumatische Antrieb ist für den Ersatz durch eine elektromechanische Einheit z.B. in Form eines Schrittmotors prädestiniert. Da dieser Typ von Aktor auf Zylinderbasis funktioniert, können der Energieumsatz sowie der Druckluftverbrauch eines Schwenkantriebs auf den Berechnungsgrundlagen desselben bestimmt werden.

Des Weiteren muss in den Berechnungen der Tatsache, dass durch die Kombination von verzahnter Kolbenstange und Zahnrad bereits ein einfaches Getriebe entstanden ist, Rechnung getragen werden. Bei Getrieben dieser Art kann von einem Wirkungsgrad <0.6 ausgegangen werden.

Pneumatisches Regelventil

Die prinzipielle Funktionsweise von pneumatischen Regelventilen ist bei den auf dem Markt erhältlichen Produkten ähnlich. Die meisten Regelventile bestehen aus den drei Hauptkomponenten Ventileinheit, Antriebseinheit und Regeleinheit.



Abbildung 4: Regelventil mit pneumatischer und elektrischer Antriebseinheit (die Regeleinheit ist hier nicht ersichtlich) [10]

Der pneumatische Stellantrieb besteht aus einem Gehäuse, in dem sich eine Feder und eine Membrane befinden. Die Feder wird über die Membrane zusammengepresst, indem die Membrane einseitig durch Druckluft beaufschlagt wird. Mit der Membrane verbunden ist die Antriebswelle, welche ihrerseits wieder mit dem Ventilstößel mechanisch gekoppelt ist.

Pneumatische Regelventile werden sehr häufig in der chemischen Prozessindustrie zur Regelung von Temperaturen, Durchflüssen, Flüssigkeitsniveaus etc. verwendet. Ein wichtiger Vorteil gegenüber elektromechanischen Regelventilen ist deren geringer Installations- und Geräteaufwand betreffend Explosionsschutz.

Des Weiteren werden Regelventile in grossen Heizungsanlagen vorwiegend zur Regelung von Temperaturen eingesetzt. Mit entsprechendem Aufwand ist dieses in der chemischen Industrie weit verbreitete pneumatische Aktorelement in vielen Fällen ersetzbar durch rein elektromechanische Komponenten. Namhafte Hersteller können in vielen Fällen bereits eine elektromechanische Antriebseinheit anstelle einer pneumatischen liefern.

Die Kinematik dieses Antriebs ist nicht rudimentär. Für energetische Betrachtungen gibt der Hersteller der Regelventile aber den Druckluftverbrauch in den technischen Daten zum jeweiligen Produkt an. Hieraus kann der Aufwand an elektrischer Energie bestimmt werden.

4.6. Energetische Verluste im Druckluftsystem

Aufgrund der Erkenntnisse aus früheren Studien [1], [2] wurde aus den Energiekenndaten alle Verlustenergien und die Nutzenergien an den pneumatischen Aktoren gemäss Abbildung 5 bestimmt. (Die Resultate sind in Tabelle 5 für die untersuchten Industriebetriebe zusammengefasst.)

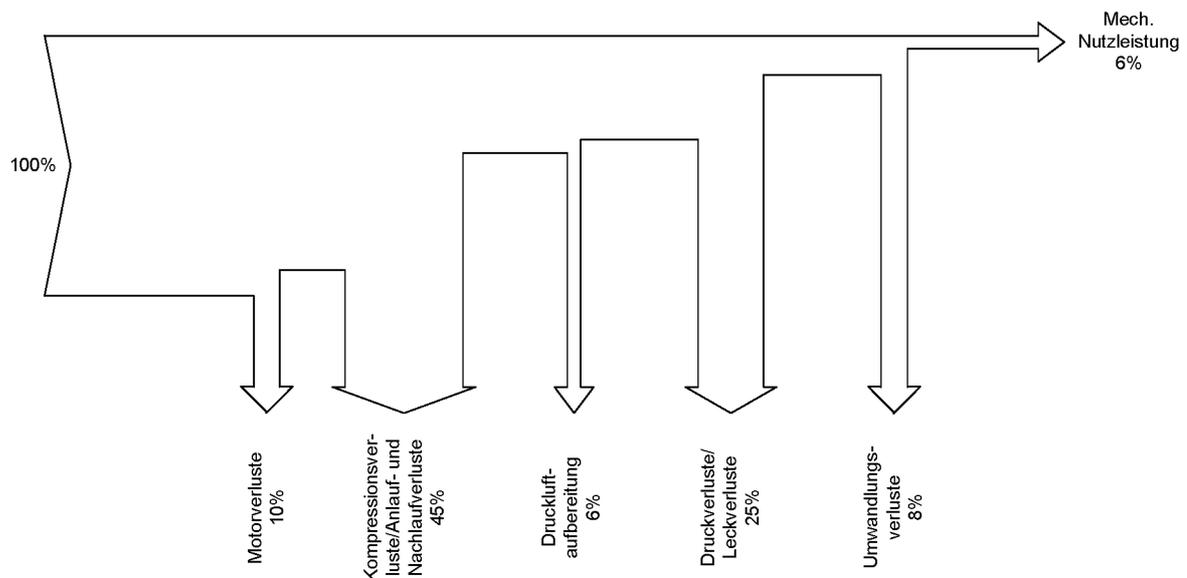


Abbildung 5: Energetische Verluste in einem Druckluftsystem (gemäss [1], [2])

5. Untersuchungsobjekte

5.1. Metallerzeugende Industrie

Als Referenz ist ein Werk der primären Metallindustrie in der Südschweiz auf das energetische Einsparpotential bezüglich der installierten Druckluftanlagen untersucht worden.

Das Objekt weist zum Zeitpunkt der Untersuchung keinerlei energetische Optimierungen in Bezug auf alle installierten Druckluftsysteme auf. Dies bedeutet, dass nach [1] mit einem mittleren Wirkungsgrad von 5% für alle Druckluftaktoren gerechnet werden kann.

Es ist zu erwähnen, dass im Werk eine zentrale Druckluftherzeugung und -aufbereitung stattfindet. Über ein Rohrleitungssystem werden die Werksbetriebe mit Druckluft versorgt. Da die Elektroantriebe der drei Hochleistungskompressoren nicht über Wechselrichter betrieben werden, schwankt der Druck im Rohrleitungssystem zwischen 5.8 und 6.4 bar. Für die Untersuchungen im Rahmen dieses Projekts wurde von einem mittleren Netzdruck von 6 bar ausgegangen.

Da die installierten Anlagen teilweise sehr alt sind, kann nicht mehr auf alle technischen Unterlagen jedes einzelnen Generators/Aktors zurückgegriffen werden.

Bei den Aktoren handelt es sich vorwiegend um Pneumatikzylinder, sowie um diverser Dichtstromförderanlagen¹ mit einem hohen Druckluftverbrauch.

5.2. Chemische Industrie

Als Referenz ist ein Werk der pharmazeutisch/chemischen Industrie in der Südschweiz auf das energetische Einsparpotential bezüglich der installierten Druckluftanlagen untersucht worden.

Das Objekt weist zum Zeitpunkt der Untersuchung bereits energetische Optimierungen im Bezug auf die installierten Druckluftsysteme auf. Es wurden vor allem Anstrengungen betreffend der Druckverluste im Verteilnetz unternommen.

Im Werk ist eine zentrale Druckluftherzeugung und -aufbereitungsanlage installiert. Über ein Verteilnetz werden die chemischen Prozessanlagen mit Druckluft versorgt. Der Druck im Rohrleitungssystem schwankt zwischen 6.0 und 6.3 bar. Für die Untersuchungen im Rahmen dieses Projekts wurde von einem Netzdruck von 6 bar ausgegangen.

Bei den Aktoren handelt es sich vorwiegend um pneumatische Regelventile.

¹ Methode zur Förderung von pulver- und granulatförmigen Stoffen

5.3. Nahrungsmittelindustrie

Als Referenz ist ein Werk der Nahrungsmittelindustrie in der Westschweiz auf das energetische Einsparpotential bezüglich der installierten Druckluftanlagen untersucht worden.

Das Objekt weist zum Zeitpunkt der Untersuchung bereits energetische Optimierungen und Messungen im Bezug auf die installierten Druckluftsysteme auf. Es wurden vor allem Anstrengungen betreffend der Druckverluste im Verteilnetz unternommen.

Im Werk sind zwei zentrale Druckluftherzeugung und -aufbereitungsanlage installiert. Über ein Verteilnetz werden die Produktionsstrassen mit Druckluft versorgt. Die Druckerzeugung ist für 12 bar ausgelegt. Sie wird jedoch nur mit 8 bar betrieben. Im Kompressormotor fallen damit übermässig hohe Magnetisierungsverluste an. Der Druckluftbedarf wächst jährlich um 10..15 %. Es besteht ein hoher Handlungsbedarf. Der Druck im Rohrleitungssystem schwankt zwischen 6.3 und 6.9 bar. Für die Untersuchungen im Rahmen dieses Projekts wurde von einem Netzdruck von 6.7 bar ausgegangen.

Bei den Aktoren handelt es sich vorwiegend um pneumatische Linearantriebe.

5.4. Verpackungsindustrie

Als Referenz ist ein Werk der Verpackungsindustrie in der Westschweiz auf das energetische Einsparpotential bezüglich der installierten Druckluftanlagen untersucht worden.

Das Objekt weist zum Zeitpunkt der Untersuchung aufgrund des grossen Bedarfs an Prozessluft und aufgrund der Umgebungsbedingungen Antriebe, welche zu 90% mit Druckluft arbeiten. Es wurden vor allem Anstrengungen betreffend der Druckverluste im Verteilnetz unternommen. Bestrebt Energie zu sparen, setzt man sich mit neuen Technologien auseinander und wird sie einsetzen, wo es sich rechnet.

Im Werk ist eine zentrale Druckluftherzeugungs- und Aufbereitungsanlage installiert. Über ein Verteilnetz werden die Produktionsstrassen mit Druckluft versorgt. Die Druckerzeugung ist für mehrere Druckpegel ausgelegt.

Bei den Aktoren handelt es sich vorwiegend um pneumatische Rotationsantriebe.

5.5. Allgemeine Vorgehensweise

In den zu untersuchenden Betrieben der chemischen und der metallherzeugenden Industrie wurden der tägliche, durch die Druckluftkompressoren verursachte elektrische Energieverbrauch, die produzierten Druckluftmengen sowie die jeweiligen Mitarbeiterzahlen ermittelt.

Aus der täglichen elektrischen Energiemenge, welche für die Erzeugung von Druckluft benötigt wird, können gemäss früheren Studien [1], [2] alle dabei entstehenden Verlustenergien sowie die mechanische Nutzenergie in den Druckluftsystemen bestimmt werden.

Die berechnete Nutzenergie aus dem Druckluftsystem muss zur Aufrechterhaltung des/der Prozesse mindestens zur Verfügung gestellt werden, damit der/die Aktoren die geforderte Arbeitsleistung erbringen können.

Wird nun das Druckluftsystem durch ein effizienteres System wie den direkten Elektroantrieb ersetzt, fallen Kompressorverluste, Druckluftaufbereitungsverluste, Druckverluste im Verteilnetz und Leckverluste weg. Das bedeutet eine Reduktion des elektrischen Energieverbrauchs um den Betrag der im Druckluftsystem anfallenden Verluste.

6. Anlagenkategorisierung und Ergebnisse der Analysen

In einer ersten Phase sind die am Projekt beteiligten Industriebetriebe der Branchen Alu-, Glasherstellung, Chemie und Verpackung auf die Verwendung von pneumatischen und hydraulischen Anlagen analysiert worden. Die bestehenden Anlagen wurden aufgenommen und anhand der verwendeten bzw. umgesetzten Energien kategorisiert.

6.1. Aufteilung der Aktorenanteile in lineare Bewegungen und Drehbewegungen

Die Analyse über die Verwendung von pneumatischen/hydraulischen Aktoren, unterteilt in prozessnotwendige Linear- und Drehbewegungen sind in der Tabelle 1 branchenspezifisch aufgelistet.

Branche	Anteil Linearaktoren [%]	Anteil Rotationsaktoren [%]
Pharmazeutisch/chemische Industrie	100	0
Metallerzeugende Industrie	100	0
Nahrungsmittelindustrie	50%	50%
Verpackungsindustrie (Glas)	20%	80%

Tabelle 1: Anteile von linearen und rotativen Aktoren

6.2. Bedarf an elektrischer Energie für die Druckluftverdichtung

Die nachfolgende Tabelle 2 listet die Aufnahme elektrischer Energie der Kompressorenanlagen in den untersuchten Betrieben auf.

Branche	Elektrische Energie- aufnahme durch Kompressoren [kWh/Tag]	Produzierte Druckluftmenge [Nm ³ /Tag]
Pharmazeutisch/chemische Industrie	5'064	42'000
Metallerzeugende Industrie	19'663	196'630
Nahrungsmittel-Industrie	3'940	29'040
Verpackungs-Industrie	13'240	96'040

Tabelle 2: Aufnahme elektrischer Energie durch Kompressorenanlagen für die Druckluftherzeugung.

6.3. Energieverluste im Pneumatiksystem

Aufgrund der Erkenntnisse aus früheren Studien [1], [2] wurden aus den Energiekenndaten alle Verlustenergien sowie die Nutzenergie an den pneumatischen Aktoren gemäss **Abbildung 1** bestimmt. Die Resultate der untersuchten Betriebe sind in der folgenden Tabelle 3 zusammengefasst.

	Verluste [kWh/d]	Bezug [kWh/d]
Betrieb der chemischen Industrie		
Bezug elektrischer Energie zur Erzeugung von Druckluft		5'064
Gesamtverluste bei der Druckluftherzeugung	4'758	
Mechanische Nutzenergie		306
Betrieb der metallherzeugenden Industrie		
Bezug elektrischer Energie zur Erzeugung von Druckluft		19'663
Gesamtverluste bei der Druckluftherzeugung	18'481	
Mechanische Nutzenergie		1'182
Betrieb der Nahrungsmittelindustrie		
Bezug elektrischer Energie zur Erzeugung von Druckluft		3'940
Gesamtverluste bei der Druckluftherzeugung	3'703	
Mechanische Nutzenergie		236
Betrieb der Verpackungsindustrie		
Bezug elektrischer Energie zur Erzeugung von Druckluft		13'240
Gesamtverluste bei der Druckluftherzeugung	12'445	
Mechanische Nutzenergie		795

Tabelle 3: Bezug von elektrischer Energie zur Erzeugung von Druckluft, sowie anfallende Verluste und mechanische Nutzenergie

6.4. Verluste im elektromechanischen System

Werden anstelle von Druckluftsystemen direkte Elektroantriebe eingesetzt, werden die Systemverluste um etwa 76% reduziert (Abbildung 6). Die mechanische Nutzenergie am Aktor muss erhalten bleiben, um die benötigte Arbeitsleistung erbringen zu können. In Systemen mit Elektroantrieben kann die mechanische Nutzenergie einem Anteil von 80% der gesamten aufzuwendenden Energiemenge entsprechen (dieser Wert kann auch tiefer liegen). Daraus kann die benötigte elektrische Energiemenge der Systeme bestimmt werden.

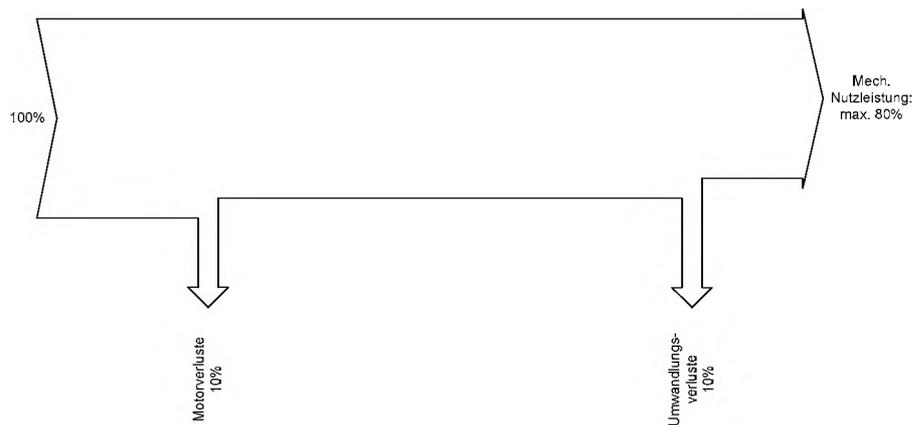


Abbildung 6: Verluste in einem System mit direktem Elektroantrieb

In der Tabelle 4 sind die mechanische Nutzenergie, die Verlustenergien und die benötigte elektrische Energie unter Verwendung von direkten Elektroantrieben für die untersuchten Objekte aufgelistet.

	Verluste [kWh/d]	Bezug [kWh/d]
Betrieb der chemischen Industrie		
Erforderliche mechanische Nutzenergie		306
Deckung der Verluste im elektromechanischen System	76	
Erforderliche elektrische Energie		382
Betrieb der metallherstellenden Industrie		
Erforderliche mechanische Nutzenergie		1'182
Deckung der Verluste im elektromechanischen System	294	
Erforderliche elektrische Energie		1'476
Betrieb der Nahrungsmittelindustrie		
Erforderliche mechanische Nutzenergie		236
Deckung der Verluste im elektromechanischen System	60	
Erforderliche elektrische Energie		296
Betrieb der Verpackungsindustrie		
Erforderliche mechanische Nutzenergie		794
Deckung der Verluste im elektromechanischen System	198	
Erforderliche elektrische Energie		993

Tabelle 4: Bezug von elektrischer Energie zur Deckung der erforderlichen Energiemengen, verursacht durch elektromechanische Systeme

6.5. Energieeinsparpotenzial

Wird der elektrische Energieaufwand von Druckluftsystem und System mit direktem Elektroantrieb zueinander in Relation gesetzt, kann das Energieeinsparpotential für die untersuchten Objekte bestimmt werden (Tabelle 5).

	Energieaufwand [kWh/d]
Betrieb der chemischen Industrie	
Bezug elektrischer Energie beim Druckluftsystem	5'064
Bezug elektrischer Energie beim System mit direkten Elektroantrieben	382
Elektrisches Energieeinsparpotential	4'682
Betrieb der metallverarbeitenden Industrie	
Bezug elektrischer Energie beim Druckluftsystem	19'663
Bezug elektrischer Energie beim System mit direkten Elektroantrieben	1'476
Elektrisches Energieeinsparpotential	18'187
Betrieb der Nahrungsmittel-Industrie	
Bezug elektrischer Energie beim Druckluftsystem	3'940
Bezug elektrischer Energie beim System mit direkten Elektroantrieben	296
Elektrisches Energieeinsparpotential	3'644
Betrieb der Verpackungs-Industrie	
Bezug elektrischer Energie beim Druckluftsystem	13'240
Bezug elektrischer Energie beim System mit direkten Elektroantrieben	993
Elektrisches Energieeinsparpotential	12'247

Tabelle 5: Tägliches elektrisches Energieeinsparpotential beim Ersatz aller Druckluftsysteme durch äquivalente elektromechanische Systeme

6.6. Hochrechnung der Einsparpotentiale für die schweizerische Industrielandschaft

Ein direkter Bezug der untersuchten Objekte aus der pharmazeutisch/chemischen und der metallzeugenden Industrie lässt sich für eine Hochrechnung nicht herstellen, da die untersuchten Druckluftanlagen einen enormen jährlichen Energieumsatz leisten. So entfällt etwa 2.5% der gesamten in der Branche aufgewendeten Elektrische Energie zur Erzeugung von Druckluft auf die untersuchten Anlagen. Würden alle in der Branche benutzten Anlagen diese Energiemengen umsetzen, würden die Anlagenstückzahlen nicht mit den auf dem Markt verkauften Stückzahlen korrelieren und das Resultat der Hochrechnung wäre stark verzerrt.

Aus diesem Grund wurde für die Bestimmung des gesamtschweizerischen Energieeinsparpotentials durch die Elimination und/oder den Ersatz von Druckluftanlagen die statistischen Daten aus [1; Tabelle 5] herangezogen. Die Daten werden gemäss NOGA [5] strukturiert.

Industriezweig	NOGA Wirtschaftszweig	Abschnitt
Betrieb der chemischen Industrie	Herstellung von chemischen Erzeugnissen	DG
Betrieb der metallverarbeitenden Industrie	Metallerzeugung und Bearbeitung	DJ
Betrieb der Nahrungsmittelindustrie	Herstellung von Nahrungs- und Genussmittel	DA
Betrieb der Verpackungs-Industrie	Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik	DI

Tabelle 6: Klassierung der Betriebe nach NOGA

Aus [1; Tabelle 5] ist ersichtlich, wie hoch der Anteil an bezogener Elektrizität zur Erzeugung von Druckluft in den Wirtschaftszweigen im Jahr 1999 war (siehe Tabelle 7).

Wirtschaftszweig	Elektrische Energiebezug für Druckluftherstellung [GWh/a]
Herstellung von chemischen Erzeugnissen	77
Metallerzeugung und Bearbeitung	99
Herstellung von Nahrungs- und Genussmittel	26
Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik	23
Total	225

Tabelle 7: Bezug elektrischer Energie für die Druckluftherstellung im Jahr 1999

Bei einem jährlichen schweizerischen Gesamtverbrauch an elektrischer Energie von 51'200GWh im Jahr 1999, entspricht der Anteil für die Druckluftherzeugung in den untersuchten Branchen etwa 0.44%.

Der jährliche schweizerische elektrische Energieverbrauch stieg von 1999 bis ins Jahr 2005 um 6'100 GWh auf 57'300 GWh. Dies entspricht einem Zuwachs von 11.9%.

Für eine Abschätzung des gesamtschweizerischen Einsparpotentials an elektrischer Energie mittels direkter Elektroantriebe anstelle von Druckluftsystemen wurde angenommen, dass sich der wachsende gesamtschweizerische Verbrauch gleichmässig auf alle Wirtschaftszweige verteilt. Somit steigt der Verbrauch an Elektrische Energie zur Druckluftherzeugung ebenfalls um 11.9%. Auf die untersuchten Branchen bezogen, bedeutet das einen Zuwachs von 27 GWh. Der geschätzte Bezug von Elektrische Energie zur Erzeugung von Druckluft in den untersuchten Branchen beläuft sich demnach auf 252 GWh für das Jahr 2005.

Wirtschaftszweig	Bezug elektrischer Energie für Druckluftherstellung [GWh/a]
Herstellung von chemischen Erzeugnissen	86
Metallerzeugung und Bearbeitung	110
Herstellung von Nahrungs- und Genussmittel	30
Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik	26
Total	252

Tabelle 8: Bezug elektrischer Energie für die Druckluftherstellung im Jahr 2005 für die untersuchten Branchen

Um vergleichbare Resultate zu erhalten, wird für die Abschätzung des gesamtschweizerischen Einsparpotentials in den untersuchten Industriezweigen dasselbe Modell wie für die untersuchten Anlagen benutzt. Die Resultate dieser Berechnungen sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

Durch den Ersatz von Druckluftsystemen durch direkte Elektroantriebe könnten in den untersuchten Branchen Chemie und Mineralien zusammen etwa 178 GWh elektrische Energie pro Jahr eingespart werden. Dies entspricht 0.32% des jährlichen, gesamtschweizerischen Stromverbrauchs.

Energieverwendung in GWh/Jahr	Chemie	Metall-industrie	Nahrungs-mittel	Mineralien
Bezug elektrischer Energie durch Druckluftanlagen	85	29	25	109
Motorverluste; 10% der bezogenen Energie	-8.5	-2.9	2.5	-10.9
Kompressionsverluste/Anlauf- und Nachlaufverluste; 45% der bezogenen Energie	-38.3	-13.1	11.3	-49.1
Verluste in der Druckluftaufbereitung; 6% der bezogenen Energie	-5.1	-1.7	1.5	-6.5
Druckverluste/Leckverluste; 25% der bezogenen Energie	-21.3	-7.3	6.3	-27
Umwandlungsverluste in den Aktoren; 8% der bezogenen Energie	-6.8	-2.3	2.0	-8.6
Mechanische Nutzenergie aus Druckluft	5.1	1.7	1.5	6.5
Motorverluste; 10% der bezogenen Energie	+0.6	+0.2	+0.2	+0.8
Umwandlungsverluste in den Aktoren; 10% der bezogenen Energie	+0.6	+0.2	+0.2	+0.8
Bezug elektrischer Energie durch direkte Elektroantriebe	6.4	2.2	1.9	8.2
Energieeinsparpotential (Bezug el. Energie durch Druckluftanlagen – Bezug el. Energie durch direkte Elektroantriebe)	78.6	26.8	23.1	100.8

Tabelle 9: Abschätzung der Einsparpotentiale für die schweizerische Industrielandschaft

Gemäss [1; Tabelle 5] beläuft sich der geschätzte Verbrauch von elektrischer Energie zur Erzeugung von Druckluft über alle Branchen und über die gesamte Schweiz im Jahr 1999 auf etwa 761 GWh/a. Für das Jahr 2005 wurde wie oben, mit einem Zuwachs 11.9% gerechnet, was einem Verbrauch an elektrischer Energie von 851GWh entspricht.

Würde die gesamte in der Schweiz installierte Druckluftleistung über alle Branchen durch direkte Elektroantriebe ersetzt, könnte der jährliche Verbrauch an elektrischer Energie um zirka 772.4 GWh reduziert werden, was einem Anteil von 1.38% auf den jährlichen, gesamtschweizerischen Stromverbrauch ausmacht (Tabelle 10).

Energieverwendung	Alle Branchen, gesamte Schweiz [GWh/a]
Bezug elektrischer Energie durch Druckluftanlagen	835
Motorverluste; 10% der bezogenen Energie	-83.5
Kompressionsverluste/Anlauf- und Nachlaufverluste; 45% der bezogenen Energie	-375.8
Verluste in der Druckluftaufbereitung; 6% der bezogenen Energie	-50.1
Druckverluste/Leckverluste; 25% der bezogenen Energie	-208.8
Umwandlungsverluste in den Aktoren; 8% der bezogenen Energie	-66.8
Mechanische Nutzenergie aus Druckluft	50.1
Motorverluste; 10% der bezogenen Energie	6.3
Umwandlungsverluste in den Aktoren; 10% der bezogenen Energie	6.3
Bezug elektrischer Energie durch direkte Elektroantriebe	62.6
Energieeinsparpotential (Bezug el. Energie durch Druckluftanlagen – Bezug el. Energie durch direkte Elektroantriebe)	772.4

Tabelle 10: Geschätztes Einsparpotential an elektrischer Energie bei Ersatz der gesamtschweizerisch installierten Druckluftleistung durch direkte Elektroantriebe für das Jahr 2005

7. Projektbeispiele zur Nutzung des Sparpotentials in Druckluftsystemen

Mittels Beispielen zum Ersatz von pneumatischen Aktoren durch elektromechanische Aktoren wird das mögliche Einsparpotenzial skizziert. Für konkrete Fälle in der Anwendung wird das pneumatische System durch das elektromechanische System ersetzt. Die beiden Systeme werden hinsichtlich wirtschaftlicher und energetischer Gesichtspunkte verglichen.

7.1. Lebenskostenvergleich Druckluftfaktor / elektromechanischer Aktor Handling

Beim Vergleich eines Druckluftfaktor mit einem elektromechanischen wird die Wirkungskette vorteilhaft rückwärts betrachtet, da in einer Produktionstrasse dieselbe mechanische Arbeit zu verrichten ist.

Für sehr viele Handlingfunktionen genügt es einen Antrieb mit einer mechanischen Dauerleistung von 300W bereitzustellen.

Vorteilhaft für Zuverlässigkeit, Genauigkeit und Repetierbarkeit, insbesondere bei Positioniersystemen, erweisen sich elektromechanische Aktoren, die möglichst wenig mechanische Übertragungselemente wie z.B. Getriebe besitzen. Ein solcher Aktor erreicht ohne viel Aufwand einen Wirkungsgrad von 85% und mehr. Für Ansteuerungsverluste ist 5% ein hoher Wert. Damit liegt der Wirkungsgrad des Aktorsystems bei 80%.

Für den Druckluftfaktor ist mit einem Leistungsbedarf von 300 Watt mechanischer Leistung zu rechnen. Aufgrund der schlechten Aktorwirkungsgrade sind beinahe 100% Umwandlungsverluste vorhanden, da die Aktor-Leckage-Verluste dominieren. Diese sind aber noch gering gegenüber den Zuleitungs-, Kompressor- und Aufbereitungsleckagen, die im Normalfall ca. 25% der gesamten Anlagenleistung ausmachen. Bezogen auf die Aktorleistung ist hier mit einem Faktor von ungefähr fünf zu rechnen. Wird der Kompressor nicht im Dauerlauf betrieben, so stellen sich dominante An- und Nachlaufverluste ein.

Die sich ergebenden elektrischen Dauerleistungen, welche für die zwei Systeme bereitgestellt werden müssen, sind in Abbildung 7 dargestellt.

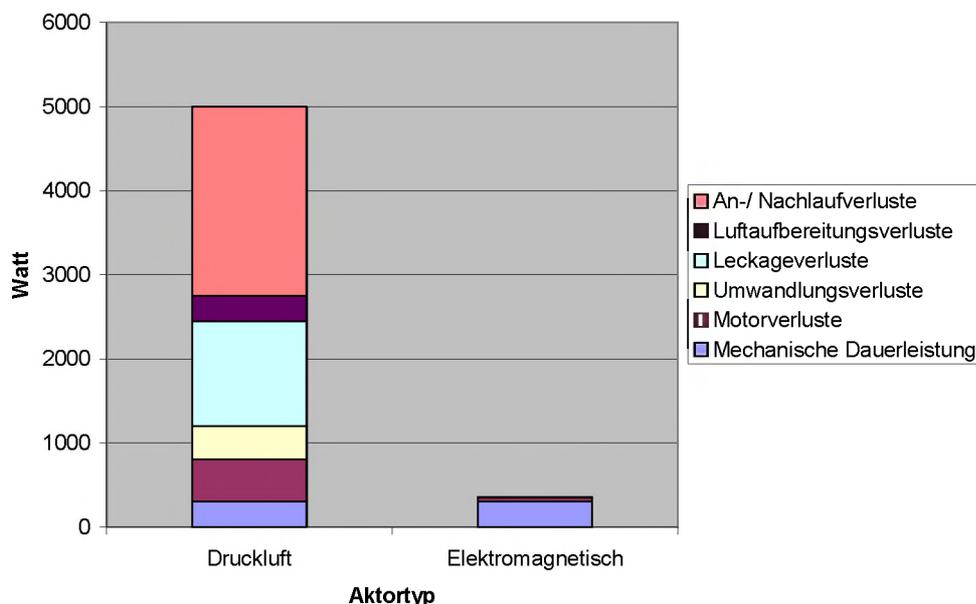


Abbildung 7: Leistungsaufnahme bei 300W mechanischer Abgabeleistung

Typischerweise werden somit pro pneumatische 300 Watt Handlingfunktion also 5kW Kompressorleistung installiert. Damit fallen 13-fache Energiekosten an. Diese werden in den folgenden Betriebskosten mit CHF 0.10 pro kWh bewertet.

Die Berücksichtigung der Investitionen der beiden Aktortypen inklusive der Installationskosten und Abschreibung über 5 Jahre, sowie die Addition der nicht unbedeutlichen Wartungskosten, welche im Falle der Drucklufteinrichtung (Schmierung, Reinigung, Filterwechsel, Leckagenbehebung) einen nicht zu vernachlässigenden Personalaufwand erzeugen, ergeben sich bei einem 3-Schicht-Betrieb die in Abbildung 8 dargestellten Jahreskosten.

Weiter muss im Fall der Druckluftherzeugung berücksichtigt werden, dass deren Abwärme noch Klimatisierungskosten nach sich zieht. Es fällt auf, dass die druckluftbetriebene Handlingfunktion damit etwa die zehnfachen Kosten der elektromechanischen erzeugt, obwohl die Gesamtinvestitionen der elektromechanischen Handlingfunktion bezogen auf die mechanische Abgabeleistung grösser sind. Dafür sind sie wartungsfrei und Energieeffizient.

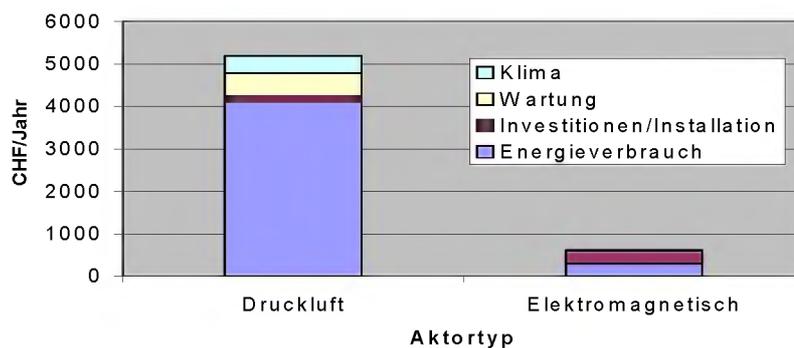


Abbildung 8: Jahres-Betriebskosten 300 W Handlingaktor

Damit kann mit einer Umstellung von Druckluftaktoren auf elektromechanische Komponenten jährlich im Schnitt CHF 4000.- pro Handlingfunktion eingespart werden. Diese **Umstellungen amortisieren** sich im Allgemeinen **deutlich unter einem Jahr**.

Es gibt heute natürlich noch viele pneumatische Aktoren, für die noch keine oder nur wenige elektromagnetische Substitutionsprodukte auf dem Markt erhältlich sind. Der Markt solcher Produkte ist aber klar im Wachsen begriffen und bietet vielfach eine Herausforderung für die projektierenden Ingenieure und die Zulieferindustrie.

7.2. Ersatz pneumatischer Antriebe einer Glasproduktionsmaschine - Beispiel 1

Glasproduktionsmaschinen sind in unabhängig arbeitende Sektionen aufgeteilt. Jede Sektion stellt aus einem Glaspfropfen eine Flasche oder ein Glascontainer her. Rund 9 pneumatische Handlingfunktionen sind heute pro Sektion zur Herstellung des Glascontainers notwendig. Diese werden heute zu 95% mit Druckluft angetrieben. Dies liegt auf der Hand, da die Glasbearbeitung auf Druckluft als Prozessmedium angewiesen ist – man unterscheidet das Vor- und Fertigblasen unter Verwendung von Druckluft, aber auch die kontrollierte Abkühlung des noch fließenden Glaskörpers erfolgt mit Druckluft.

Der Einsatz alternativer Antriebsprinzipien stellt höchste Anforderung an die Lebensdauer und Zuverlässigkeit des Antriebs, unter anderem wegen der Umgebungsbedingungen unter welchen er die Funktion erfüllen muss. Es ist daher verständlich, dass die Industrie eine höchst konservative Einstellung zur Antriebssubstitution zeigt.

Die Abbildung 9 zeigt Teile der zwei Mechanismen „Take-Out“ und „Pusher“, welche die Glasbehälter aus der Glasform entnehmen und auf das Förderband schieben und verdeutlicht die Umgebung des noch glühenden Glases.

Analysen zeigen, dass heute mit ausgefeilten Druckluftantrieben bezüglich Wiederholgenauigkeit und Dynamik an Grenzen gestossen wird, die mit einem elektromechanischen Antrieb einfach überwunden werden können. Damit lässt sich die Leistungsfähigkeit der Glasherstellung schnell einmal um 3..5%

steigern. Allein durch diese Leistungssteigerung amortisieren sich die in der Anschaffung teureren Elektroantrieben innerhalb eines Jahrs.

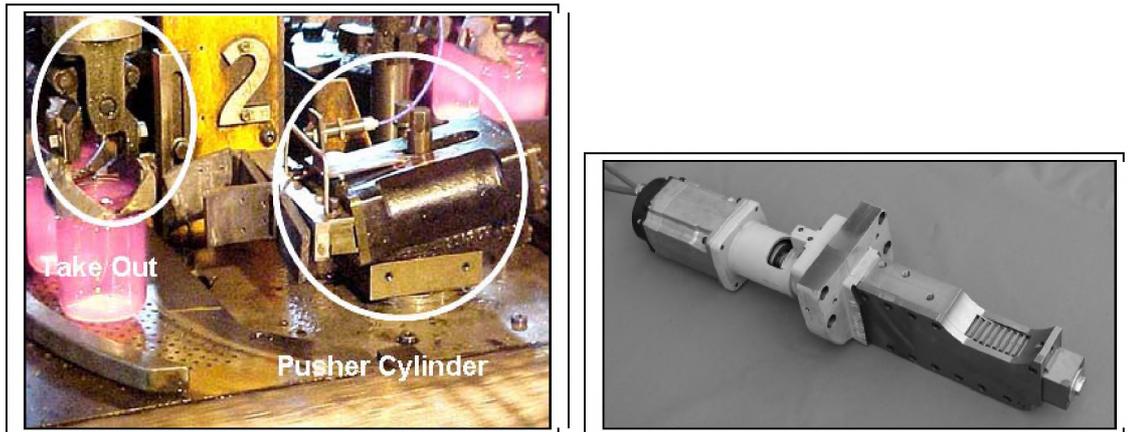


Abbildung 9: Teilprozess bei der Glasherstellung mit pneumatischen Aktoren (links) und möglicher elektromechanischer Ersatzaktor in Form eines Servo Invert (rechts).

Die Energieeinsparungen, die durch die Substitution der pneumatischen Aktoren durch elektromagnetische Servo-Aktoren entstehen, mögen zwar gemessen am Gesamtenergieverbrauch der Glasherstellung (Ofen) gering erscheinen. Aber aus Tabelle 5 ist ersichtlich, dass man einem kWh-Preis von 10 Rappen pro Tag über CHF 1200.- an Energiekosten einsparen kann. Dies bedeutet jährlich wiederkehrende und steigende Einsparungen von über CHF 300'000.- für ein Werk mit 36 Glas-Herstell-Sektionen

7.3. Ersatz pneumatischer Krustenbrechereinheit in einer Metallschmelze– Beispiel 2

Um den Spannungsabfall über einem Elektrolyseofen in einer Metallschmelze konstant zu halten, ist der Ofen in regelmässigen zeitlichen Abständen mit Aluminiumoxid zu beschicken. Das Aluminiumoxid wird dabei direkt dem flüssigen Metallbad zugeführt. Die permanente Bildung einer festen Schicht aus Aluminiumfluorid - einem Flussmittel - über dem flüssigen Metall verhindert dies.

Mit einem pneumatisch bewegten Krustenbrecher wird derzeit die feste Schicht aus Aluminiumfluorid durchbrochen. Über die dabei entstehende Öffnung zum Metallbad wird diesem die nötige Menge an Aluminiumoxid zugeführt. Pro Elektrolyseofen wird eine Krustenbrechereinheit benötigt. Diese Einheit besteht beim pneumatischen System aus zwei Druckluftzylindern auf der Aktoreenseite, einer Steuereinheit und einer Druckluftspeisung gemäss Abbildung 10.

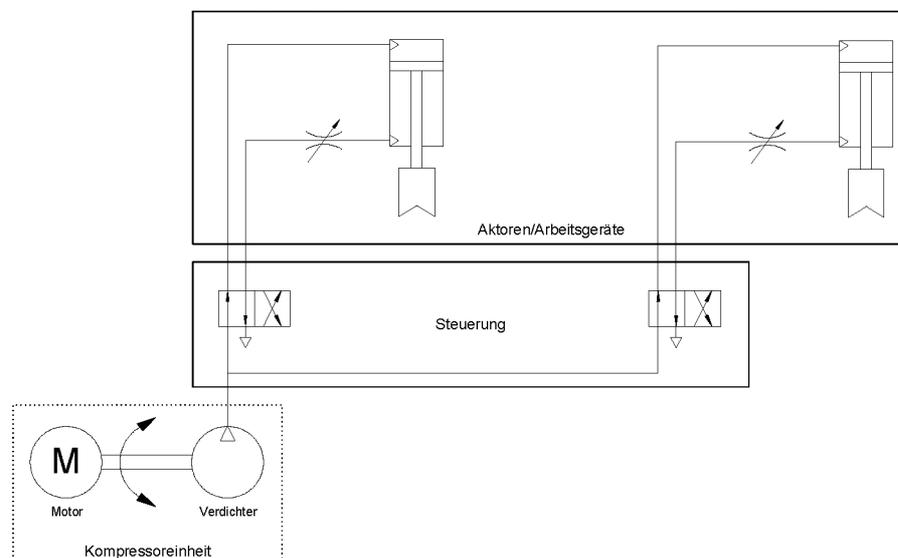


Abbildung 10: pneumatische Krustenbrechereinheit

Anstelle des pneumatischen Antriebs kann ein elektromechanisches System aus zwei Integraldrives der Effizienzklasse eff1 auf der Antriebsseite und aus zwei Hubzylindergetrieben mit Kugelspindeln sowie einer Führungsmechanik auf der Aktoreseite, gemäss Abbildung 11, eingesetzt werden.

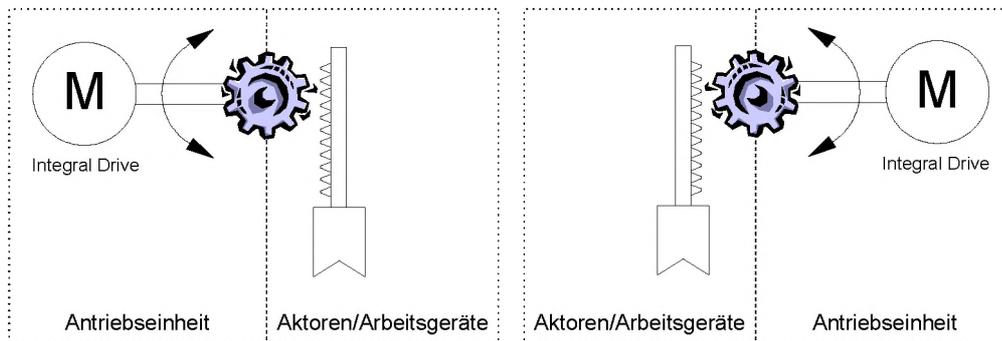


Abbildung 11: Elektromechanische Krustenbrechereinheit

Wie beim pneumatischen System wird pro Ofen ebenfalls eine Krustenbrechereinheit benötigt. Das elektromechanische System weist bei der Initialinvestition gegenüber dem pneumatischen System Mehrkosten in der Höhe von CHF 3'752.- auf. Der Vergleich der Investitionskosten ist in der Tabelle 11 im Detail aufgelistet.

Pneumatisches System		Elektromechanisches System	
Komponente	Kosten [CHF]	Komponente	Kosten [CHF]
Kompressoreinheit	5'000.-	Antriebseinheit, Integral Drive (2x1462.-)	2'924.-
Steuerung	650.-	Steuerung	650.-
Druckluftzylinder (2x1'911.-)	3'822.-	Hubzylindergetriebe (2x4'825.-)	9'650.-
Krustenmeissel (2x120.-)	240.-	Krustenmeissel (2x120.-)	240.-
Meisselabsteifkasten (2x480.-)	960.-	Meisselabsteifkasten (2x480.-)	960.-
Total	10'672.-	Total	14'424.-

Tabelle 11: Vergleich der Investitionskosten einer pneumatisch, bzw. elektrisch angetriebenen Krustenbrechereinheit

Der Vergleich des täglichen Energiebedarfs der beiden Systeme ist in der Tabelle 12 aufgelistet. Es wurde von einem lokal isolierten System ausgegangen. Somit bleibt das Druckluft-Verteilnetz klein und Leckage- und Reibungsverluste können tief gehalten werden. Für das vorliegende Beispiel wurde von Netzverlusten in der Grössenordnung von 10% ausgegangen.

Bei der Annahme eines mittleren Strompreises von 10 Rp./kWh resultieren für das pneumatische System bei einer jährlich bezogenen Energiemenge von 14'016kWh Kosten in der Höhe von CHF 1'402.- und für das elektrische System mit einem jährlichen Energiebedarf von 1'248kWh Kosten von CHF 125.- Die jährlichen Einsparungen beim Einsatz eines elektromechanischen Systems gegenüber einem pneumatischen System betragen CHF 1'276.- oder 91% pro Jahr.

Pneumatisches System		Elektromechanisches System	
Laufzeit Kompressor (zum Betrieb beider Krustenbrecherzylinder)	24h	Laufzeit Motor(en) 2 x 700 Zyklen à 8 Sekunden	3.1h
Leistungsaufnahme des Kompressors (el.)	1.6kW	Leistungsaufnahme der Motoren (el.)	1.1kW
Energie INPUT	38.4kWh/d	Energie INPUT	3.42kWh/d
Druckluftverbrauch	308.219m ³ /d	-	-
Netzdruck	6bar	-	-
-	-	Wirkungsgrad Motor	84%
-	-	Wirkungsgrad Frequenzumrichter	98%
-	-	Wirkungsgrad Getriebe	90%
Gesamtwirkungsgrad	22.3%	Gesamtwirkungsgrad	74%
Energie OUTPUT	8.55kWh/d	Energie OUTPUT	2.53kWh/d
zur Kontrolle:			
Aktorlaufzeit für alle Aktoren gemeinsam	10.3h	Aktorlaufzeit für alle Aktoren gemeinsam	3.1h
Aktorleistung	0.830kW	Aktorleistung	0.816kW

Tabelle 12: Vergleich des Energiebedarfs einer pneumatisch, bzw. elektrisch angetriebenen Krustenbrechereinheit

Für die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit ist die Bestimmung der Payback-Zeit ausschlaggebend. Bei einer technischen Lebensdauer der Systeme von 15 Jahren, kann der ROI² für das elektromechanische System folgendermassen bestimmt werden:

$$ROI = \frac{\text{Totalertrag}}{\text{Investitionskosten}} \times 100\% \quad (6)$$

wobei der Totalerfolg in diesem Fall aus den eingesparten monetären Aufwänden für den Mehrbezug von elektrischer Energie beim pneumatischen System, multipliziert mit der technischen Lebensdauer, besteht. Es kann also geschrieben werden:

$$ROI = \frac{\text{CHF } 15 \times 1'276}{\text{CHF } 14'424} \times 100\% = 133\% \quad (7)$$

Die Payback-Zeit der Mehrinvestitionen beträgt ca. 3 Jahre (siehe Tabelle 13)

² Return on Investment (Kapitalrendite)

	Pneumatisches System in [CHF]	Elektromechanisches System in [CHF]
Initialinvestition	10'672.-	14'424.-
Mehraufwand Initialinvestition	-	3'752.-
Energiekosten pro Jahr	1'401.60	124.85
Mehraufwand Energie pro Jahr	1'276.75	-
Pay-Back	-	3 Jahre

Tabelle 13: Payback-Zeit einer elektrisch angetriebenen Krustenbrechereinheit

7.4. Ersatz eines pneumatischen durch ein elektromechanisches Regelventil – Beispiel 3

Regelventile für flüssige und gasförmige Medien werden in vielen prozesstechnischen Anlagen in den unterschiedlichsten Industriezweigen zur Regelung von Durchflüssen, Temperaturen, Drücken usw. eingesetzt. Um einen aussagekräftigen Vergleich zu machen, wird von einer Prozessanlage mit 45 Regelventilen desselben Typs als Grundkonfiguration für den Vergleich verwendet.

Das pneumatische Regelventil besteht aus drei Hauptkomponenten (siehe Abbildung 12). Dies sind der Ventilblock mit Spindel und Ventilkegel, der Stellantrieb sowie ein elektropneumatischer Stellungsregler. Dem Stellungsregler wird ein Signal von 4-20mA aufgeprägt. Dieses Stromsignal wird im elektropneumatischen Stellungsregler mittels Druckluft in einen Stelldruck umgewandelt. Der Stelldruck öffnet oder schliesst das Be- bzw. Entlüftungsventil für den Stellantrieb. Damit wird die Membrane im Stellantrieb gespannt bzw. entspannt. Das Spannen bzw. Entspannen der Stellantriebsmembrane verursacht die Verfahrbewegung des Hauptventilkegels des Regelventils.

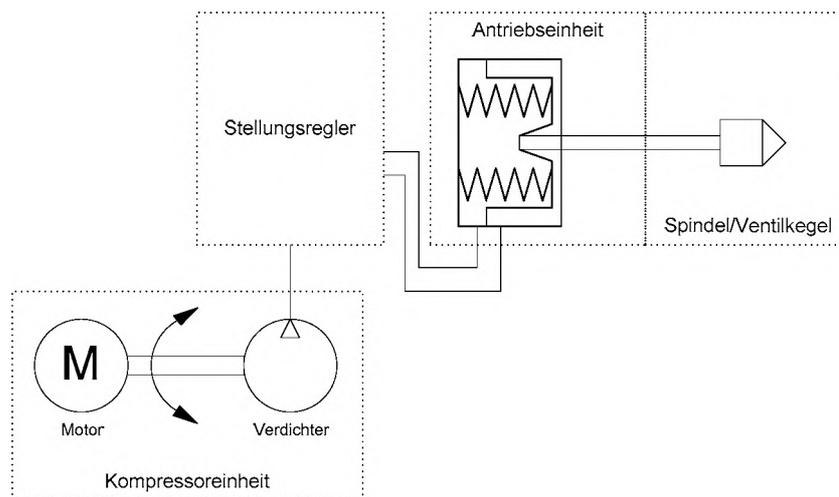


Abbildung 12: pneumatisches Regelventil

Das elektromechanische Regelventil besteht ebenfalls aus drei Hauptkomponenten, der Steuer- und Regelelektronik, dem Stellmotor und dem Ventilblock (siehe Abbildung 13).

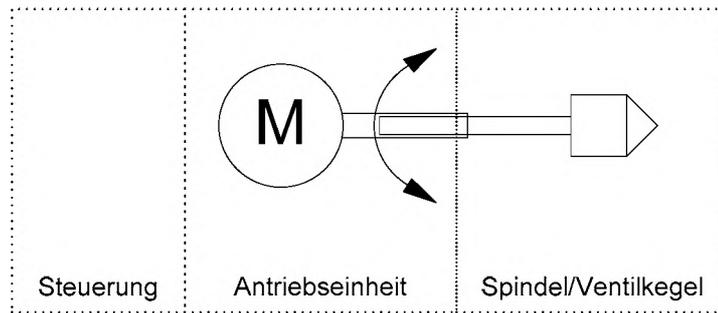


Abbildung 13: elektromechanisches Regelventil

Der Einsatz von elektromechanischen Regelventilen für die betrachtete Prozessanlage mit 45 Regelventilen weist bei der Initialinvestition gegenüber dem pneumatischen System Mehrkosten in der Höhe von CHF 62'736.- auf. Der Vergleich der Investitionskosten ist in der Tabelle 14 im Detail aufgelistet.

Pneumatisches System		Elektromechanisches System	
Komponente	Kosten [CHF]	Komponente	Kosten [CHF]
Kompressoreinheit	6'650.-	-	-
Regelventil Stückpreis: 2'611.35 Stückzahl: 45	117'510.75	Regelventil Stückpreis: 1'365.- Stückzahl: 45	61'425
Total	124'160.75	Total	61'425.-

Tabelle 14: Vergleich der Investitionskosten einer Prozessanlage mit 45 pneumatisch bzw. elektrisch angetriebenen Regelventilen

Pneumatisches System		Elektromechanisches System	
Laufzeit Kompressor	24h	Laufzeit Stellantrieb(e)	24h
Leistungsaufnahme des Kompressors (el.)	1.6kW	Leistungsaufnahme der Stellantriebe (45x3W el.)	0.135kW
Energie INPUT	38.4kWh/d	Energie INPUT	3.24kWh/d
Druckluftverbrauch	340.2m ³ /d	-	-
Netzdruck	6bar	-	-
Geschätzter Gesamtwirkungsgrad	5.9%	Geschätzter Gesamtwirkungsgrad	70%
Energie OUTPUT	2.268kWh/d	Energie OUTPUT	2.268kWh/d
zur Kontrolle:			
Aktorlaufzeit für alle Aktoren gemeinsam	24h	Aktorlaufzeit für alle Aktoren gemeinsam	24h
Aktorleistung (45 Stück)	94.5W	Aktorleistung (45 Stück)	94.5W

Tabelle 15: Vergleich des Energiebedarfs einer Prozessanlage mit 45 pneumatisch bzw. elektrisch angetriebenen Regelventilen

Der Vergleich des täglichen Energiebedarfs der beiden Systeme ist in der Tabelle 15 aufgelistet. Alle Daten sind für einen vollen Tag (24 Stunden) und 45 Regelventilen unter Dauerbetrieb (Öffnen – Schliessen – Öffnen) angegeben. Unter der Annahme eines mittleren Strompreises von 10Rp./kWh resultieren für das pneumatische System bei einer jährlich bezogenen Energiemenge von 14'016kWh Kosten in der Höhe von CHF 1'402.- und für das elektromechanische System mit einem jährlichen Energiebedarf von 1'183 kWh Kosten von CHF 118.-. Die jährlichen Einsparungen beim Einsatz eines elektromechanischen Systems gegenüber einem pneumatischen System betragen CHF 1'284.- oder 91% pro Jahr.

	Pneumatisches System in [CHF]	Elektromechanisches System in [CHF]
Initialinvestition	124'161.-	61'425.-
Mehraufwand Initialinvestition	62'736.-	-
Energiekosten pro Jahr	1'402.-	118.-
Mehraufwand Energie pro Jahr	1'284.-	-

Tabelle 16: Kostengegenüberstellung des pneumatischen und elektromechanischen Regelventils

Ob der Einbau resp. Ersatz eines pneumatischen durch ein rein elektromechanisches Regelventil sich als sinnvoll erweist, ist nicht nur von energietechnischen und finanziellen Überlegungen abhängig. Prozesstechnische Aspekte - z.B. explosionsgefährdeter Umgebung – sind ausschlaggebend für den Entscheid über die Wahl von pneumatisch oder elektrisch angetriebenen Regelventilen. Darum ist für jeden Einsatzfall eine Neubeurteilung unabdingbar.

7.5. Ersatz eines pneumatischen durch einen elektromechanischen Zylinder – Beispiel 4

Im folgenden Beispiel werden der Einsatz eines pneumatischen und eines elektromechanischen Zylinders energetisch und wirtschaftlich verglichen. Die zwei Vergleichsobjekte sind in Abbildung 14 dargestellt.



Abbildung 14: pneumatischer und elektromechanischer Zylinder [11, 12]

Aufgrund der Kenndaten des elektromechanischen Zylinders wurde ein pneumatischer Zylinder mit der ähnlichsten Spezifikation ausgewählt.

Der elektromechanische Zylinder besteht aus einem Servomotor mit Inkrementalgeber. Die Schubstange besteht aus einer Kugelumlaufspindel, die naturgemäss einen hohen Wirkungsgrad aufweist. Die maximale Kraft an der Schubstange beträgt 358N. Dies erlaubt das Verschieben von

Lasten in horizontaler Richtung von bis zu 40kg bei einer Verfahrgeschwindigkeit von 100mm/s, und in vertikale Richtung von 15kg bei einer Verfahrgeschwindigkeit von 50mm/s.

Bei der pneumatischen Ausführung handelt es sich um einen Standard-Pneumatikzylinder mit einem Kolbendurchmesser von 32mm. Es wird von einem pneumatischen Netzdruck von 6 bar ausgegangen. Damit erreicht der ausgewählte Zylinder aufgrund der Kinematik 25% höhere Schubstangenkräfte als die elektromechanische Ausführung (480N), entspricht damit jedoch einer Normgrösse für Pneumatikzylinder. Mit der nächst kleineren Normausführung (Kolbendurchmesser 25mm/295N) werden die Spezifikationen entsprechend der elektromechanischen Vorgabe nicht erreicht.

Zum Vergleich wird eine Anlage mit jeweils 50 pneumatischen resp. elektromechanischen Aktoren mit einem Hub von 250mm ausgerüstet. Es wird angenommen, dass die Schubstangenbelastung bei jedem Aktor in horizontale Richtung wirkt.

Vergleich Investitionskosten

Pneumatischer Zylinder		Elektromechanischer Zylinder	
Komponente	Kosten [sFr.]	Komponente	Kosten [sFr.]
Kompressoreinheit	5'000.-	-	-
Pneumatikzylinder Stückpreis: 150.00 Stückzahl: 50	7'500.-	Elektrozylinder Stückpreis: 720.- Stückzahl: 50	36'000.-
Steuerung (inkl. Wartungseinheiten, Öler, Schalldämpfer, Druckregler, Magnetventile und el. Ansteuerung) Stückpreis: 180.- Stückzahl: 50	9'000.-	Controllereinheit Stückpreis: 460.- Stückzahl: 50	23'000.-
Total	21'500.-	Total	59'000.-

Tabelle 17: Vergleich der Investitionskosten einer Prozessanlage mit 50 pneumatischen bzw. elektromechanischen Zylindern

Energetische Betrachtung

Alle Daten sind für einen vollen Tag (24 Stunden) und 50 Zylinder angegeben. Jeder der 50 Zylinder macht während den 24 Stunden 1000 Zyklen. Für die Berechnung des pneumatischen Systems wurde von einem Druckluftnetz mit Aufbereitungsverluste, Leckageverlusten und Aktorverlusten gemäss Abbildung 5 ausgegangen. Die Kompressorlaufzeit wurde entsprechend der kinetischen Berechnungen der Pneumatikzylinder und den technischen Angaben des Kompressorherstellers ermittelt.

Es ergibt sich ein Unterschied der Ausgangsenergiemengen. Dies ist einerseits eine Konsequenz aus der Wahl der Standard Pneumatikzylinder mit einem Kolbendurchmesser von 32mm, andererseits der Verfahrgeschwindigkeit von 100mm/s für die eingesetzten Elektrozylinder im betrachteten Beispiel.

Die Laufzeit der Elektrozylinder und somit die umgesetzte Energiemenge sind direkt mit der Verfahrgeschwindigkeit gekoppelt.

Der Arbeitsluftdruck an den einzelnen Pneumatikzylindern entspricht im Durchschnitt 6 bar. Bei den meisten pneumatischen Systemen wird ein Zylinder unabhängig davon, ob er die maximal mögliche Kraft an der Schubstange aufbringen muss oder nicht, dies entsprechend den vorhandenen Druckverhältnissen tun, was soviel bedeutet, dass immer das Maximum an Druckluftvolumen verbraucht wird, obwohl 2/3 (6 bar -> 4 bar) vielleicht ausreichen würden. Bei den zu verdrängenden Luftvolumina (Zy-

lindergeometrie) kann der Druckluftbedarf des pneumatischen Systems und damit die Kompressorlaufzeit und der Energiebedarf einfach ermitteln werden.

Pneumatisches System		Elektromechanisches System	
Laufzeit Kompressor	11.0h	Laufzeit pro Servomotor	1.4h
Leistungsaufnahme des Kompressors (el.)	1.6kW	Leistungsaufnahme der Stellantriebe (50x36W el.)	1.8kW
Energie INPUT	17.57kWh/d	Energie INPUT	2.52kWh/d
Druckluftverbrauch	112.0m ³ /d	-	-
Netzdruck	6bar	-	-
Geschätzter Gesamtwirkungsgrad	17.7%	Geschätzter Gesamtwirkungsgrad	70%
Energie OUTPUT	3.115kWh/d	Energie OUTPUT	1.76kWh/d

Tabelle 18: Vergleich des Energiebedarfs einer Prozessanlage mit 50 pneumatischen bzw. elektromechanischen Zylindern

Unter der Annahme eines mittleren Strompreises von 10Rp./kWh, ergeben sich für die beiden Systeme folgende jährliche Energiekosten:

	Pneumatisches System in [CHF/a]	Elektromechanisches System in [CHF/a]
Initialinvestition	21'500.-	59'000.-
Mehraufwand Initialinvestition		37'500.-
Energiekosten pro Jahr	642.-	92.-
Mehraufwand Energie pro Jahr	550.-	-
Pay-Back	-	68 Jahre

Tabelle 19: Payback-Zeit einer Prozessanlage mit 50 elektromechanischen Hochlastzylindern

Die jährlichen Einsparungen beim Einsatz von elektromechanischen Zylindern gegenüber pneumatischen betragen auf energetischer Ebene 5'500kWh. Dies entspricht einem monetären Gegenwert von CHF 550. Trotz der höheren Betriebskosten der pneumatischen Anlage könnte in diesem Fall die Investition in eine elektromechanische Ausrüstung erst nach 68 Jahren amortisiert werden. Hier lohnt sich aus wirtschaftlicher Sicht der Einsatz von elektromechanischen Komponenten Anstelle von pneumatischen nicht.

8. Grundlagen zu Hydrauliksystemen

8.1. Hydrauliksysteme

Unter Hydraulik werden alle Antriebs-, Steuer- und Regelbauteile einer Maschine, mit denen durch den Druck in einer Flüssigkeit Kräfte übertragen werden, verstanden. Die Hydraulik gelangt vor allem im Schwermaschinenbau, wie im Pressenbau oder an Kran- und Baufahrzeugen zum Einsatz. Ein weiterer Einsatzbereich der Hydraulik ist der Werkzeugmaschinenbau, wo hydraulische Bauteile zum Spannen von Werkzeugen oder Werkstücken und für Transportbewegungen verwendet werden.

Mit Hilfe von elektronischen Einrichtungen kann mittels Hydraulik eine hohe Positionier- und Geschwindigkeitspräzision erreicht werden.

Bei den zur Leistungsübertragung verwendeten Fluiden handelt es sich in der Regel um spezielle Mineralöle, welche in zunehmendem Masse durch umweltverträgliche Ester und Glykole ersetzt werden.

Bei fluidtechnischen Maschinen wird grundsätzlich zwischen hydrodynamischen und hydrostatischen Antriebssystemen unterschieden. Hydrodynamische Antriebe arbeiten mit grossen Fluidströmen bei eher moderaten Druckverhältnissen, während ein hydrostatischer Antrieb sich durch einen geringen Fluidstrom bei hohem Druck auszeichnet. In der Gesamtheit der technischen Hydraulik dominiert der hydrostatische Antrieb. Energetisch ist der hydrostatische Antrieb häufig die optimale Getriebeart.

Hydraulische Systeme sind vom Prinzip her den pneumatische Antrieben ähnlich, haben aber davon abweichende Eigenschaften. So wird bei der Hydraulik jeweils ein geschlossener Fluidkreislauf mit einem Vor- und Rücklauf gefordert, während dessen die Abluft in der Drucklufttechnik meist in die Umgebung abgeblasen wird. Des Weiteren könne mit hydraulischen Systemen viel grössere Kräfte und Momente übertragen werden als mit Druckluft.

8.2. Druck- und Volumenstromerzeugung

Mit Hilfe von Pumpen ist es möglich, mechanische Energie in die Hydraulikflüssigkeit zu transferieren. Dies geschieht unter permanenter Verdrängung von Flüssigkeit aus der Saugleitung in die Druckleitung. Es wird Grundsätzlich zwischen Zahnradpumpen, Flügelzellenpumpen und Kolbenpumpen unterschieden. Eine feinere Abstufung ist aus Abbildung 15 ersichtlich.

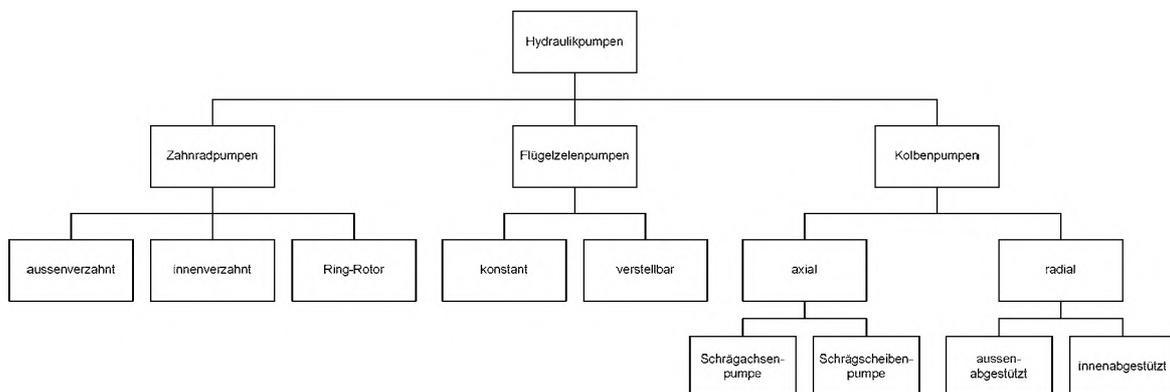


Abbildung 15: Arten von Hydraulikpumpen [7]

8.3. Steuerung

Die Steuerung von Antrieben/Aktoren erfolgt meist über Wegeventile, deren Angebot auf dem Markt mannigfaltig ist. Häufig eingesetzt werden Wegeventile, die mit Hilfe von Magnetspulen umgesteuert werden können, und die zum Beispiel einen Zylinder zum ausfahren/einfahren bewegen können.

8.4. Antriebe/Aktorik

Die Antriebe und die Aktorik in der Hydraulik sind wie in der Pneumatik vielfältig. Mit Hilfe von Flüssigkeiten unter Druck werden Rotations- sowie Linearbewegungen ausgeführt. Dazu kommen Hydraul-

likmotoren verschiedenster Bauformen und Hydraulikzylinder zum Einsatz. Schwenkantriebe sind eine weitere Art von Aktoren, welche für Rotationsbewegungen bis zu einem Vollkreis benutzt werden.

8.5. Energetische Verluste im Hydrauliksystem

Aufgrund der Erkenntnisse eines Forschungsprojekts der TU Dresden [6] können aus den Energiekennwerten alle Verlustenergien und die Nutzenergie an den hydraulischen Aktoren gemäss Abbildung 16 bestimmt werden.

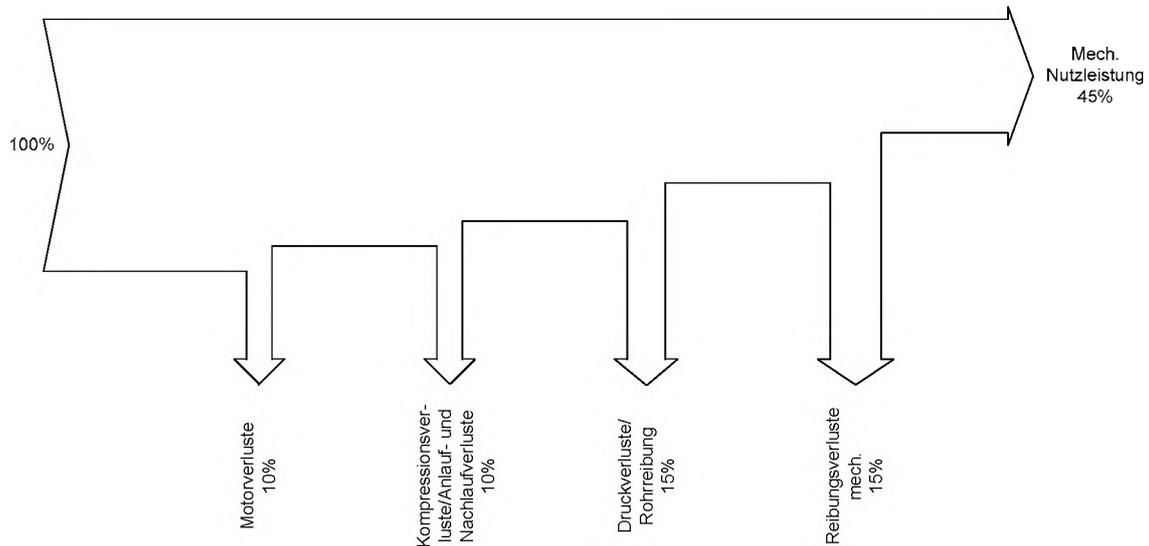


Abbildung 16: Energetische Verluste in einem Hydrauliksystem [6]

9. Untersuchungsobjekte

9.1. Metallerzeugende Industrie

Als Referenz ist ein Werk der primären Metallindustrie in der Südschweiz auf das energetische Einsparpotential bezüglich der installierten Hydraulikleistung untersucht worden.

Das Objekt weist zum Zeitpunkt der Untersuchung keinerlei energetische Optimierungen in Bezug auf alle installierten Hydraulikanlagen auf. Dies bedeutet, dass nach [6] mit einem mittleren Wirkungsgrad von 45% für alle Hydraulikanlagen gerechnet werden kann.

Es ist zu erwähnen, dass im Werk mehrere zentrale Hydraulikaggregate, die zur Speisung von jeweils mehreren Anlagen/Teilanlagen dienen, vorzufinden sind. Daneben gibt es einige dezentrale Aggregate, welche zur Speisung von isolierten Maschinen dienen.

Bei den Aktoren handelt es sich vorwiegend um Hydraulikzylinder, sowie um hydraulische Schwenkantriebe.

9.2. Pharmazeutische Industrie

Die untersuchte Anlage besteht aus 7 im Untergeschoss installierten Hydraulikpumpen, die parallel ein Rohrnetz mit einem Öldruck von 180 bar speisen. Verbraucherseitig sind auf verschiedenen Etagen des Gebäudes eine Reihe von Rührwerken, Zentrifugen, Rührdrucknutschen und Doppelkonustrockner installiert.

Bei den Pumpen handelt es sich sogenannte Axialkolbenpumpen, deren Förderstrom im Bereich 0 .. 330 l/min über den Anstellwinkel einer Stellscheibe geregelt werden kann. Die gesamte Anlage weist

einen Stellbereich der Fördermenge von 0 bis ca. 2500 l/min auf, der über das Zu- und Wegschalten einzelner Antriebe abgedeckt wird. Dabei erfolgt die Steuerung des Stellwinkels so, dass alle aktiven Pumpen stets einen gleichmässigen Anteil des Gesamtförderstromes liefern.



Abbildung 17: *Hydraulikpumpen*

Die von der Pumpenanlage produzierte Abwärme wird mit einem Umluftventilator und einem Kältekompressor abgeführt.

9.3. Allgemeine Vorgehensweise

In beiden Betrieben wurde der tägliche, durch Hydrauliksysteme verursachte elektrische Energieverbrauch ermittelt.

Aus der täglichen elektrischen Energiemenge, welche für die Erzeugung von Öldruck benötigt wird, können gemäss früheren Studien [6] alle dabei entstehenden Verlustenergien sowie die mechanische Nutzenergie abgeschätzt werden.

Die berechnete Nutzenergie aus den Hydrauliksystemen muss zur Aufrechterhaltung des/der Prozesse mindestens zur Verfügung gestellt werden, damit der/die Aktoren die geforderte Arbeitsleistung erbringen können.

Werden nun die Hydrauliksysteme durch effizientere Systeme auf elektromechanischer Basis mit direkten Elektroantrieben ersetzt, fallen Pumpenverluste, Ölaufbereitungsverluste (Filter/Ölheizungen), Druckverluste in den Verteilnetzen, allfällige Leckverluste etc. weg. Dies bedeutet eine Reduktion des Stromverbrauchs um den Betrag dieser Verluste.

10. Untersuchungsergebnis

10.1. Grundlagendaten

Der untersuchte metallerzeugende Betrieb ist in 4 kleine Untereinheiten aufgegliedert. Die Anzahl an ölhydraulischen Aggregaten und Aktoren sind in Tabelle 20 zusammengefasst.

Werksbetrieb / Untereinheit	Aggregate	Installierte Leistung [kW]	Anzahl Aktoren
Anodenbehandlung und Transport	7	96	45
Anodenstangenproduktion	8	75	25
Restanodenbehandlung	0	0	0
Anodennutzung	0	0	0
Total	15	171	70

Tabelle 20: Grundlagendaten zu den eingesetzten hydraulischen Anlagen

10.2. Energieverluste im Hydrauliksystem

Die Betriebe, welche über keine ölhydraulischen Aggregate und Aktoren verfügen, werden in den folgenden Betrachtungen ausgeschlossen.

Aufgrund von akquirierten Daten im Untersuchungsbetrieb und kinematischer Berechnungen wurde der Systemwirkungsgrad der ölhydraulischen Anlagen in den einzelnen Betrieben bestimmt (siehe Tabelle 21). Der Durchschnitt der resultierenden Wirkungsgrade liegen etwa 10% unterhalb des Wirkungsgrads von Referenzmessungen aus [6]. Diese Diskrepanz ist auf das Alter der untersuchten Anlagen zurückzuführen.

Werksbetrieb / Untereinheit	Elektrische Energie [kWh/d]	erforderliche mechanische Energie [kWh/d]	Verluste [kWh/d]	Effizienz [%]
Anodenbehandlung und Transport	170	49	121	28.8
Anodenstangenproduktion	253	100	135	39.5
Total	423	149	274	35.2

Tabelle 21: Energieverluste in ölhydraulischen Systemen eines metallerzeugenden Betriebs

In Tabelle 22 sind die Rührwerkdaten des Pharmabetriebes aufgelistet.

Maximales Drehmoment [Nm]	Maximale Drehzahl [1/min]	Leistung [kW]	Anzahl	Installierte Leistung [kW]
655	200	13.71	4	54.85
846	200	17.71	10	177.10
1430	200	29.93	5	149.67
1840	200	38.52	4	154.07
2600	200	54.43	2	108.85
3680	200	77.03	4	308.14
Total			29	952.68

Tabelle 22: Leistungsdaten der Rührwerke

Die Rührwerke sind drehzahlmässig überdimensioniert. Sie werden üblicherweise mit einer Drehzahl zwischen 40 - 60 [1/min] betrieben.

Die weiteren Hydraulikantriebe, (Zentrifugen, Nutschen und Konustrockner) wurden nicht einzeln untersucht. Eine Abschätzung zeigt, dass sie etwa im gleichen Leistungsbereich liegen.

10.3. Verluste im elektromechanischen System

Aus Tabelle 23 sind die mechanische Nutzenergie, die Verlustenergien und die aufzuwendende elektrische Energiemenge unter Verwendung von direkten Elektroantrieben für das untersuchte Objekt aufgelistet. Für die elektromechanische Ausrüstung wurde von einem mittleren Wirkungsgrad von 80% ausgegangen.

Werksbetrieb / Untereinheit	Mechanische Nutzenergie [kWh/d]	theoretische Verluste [kWh/d]	benötigte elektrische Energiemenge [kWh/d]
Anodenbehandlung und Transport	49	12	61
Anodenstangenproduktion	100	25	125
Total	149	37	186

Tabelle 23: Energieverluste in elektromechanischen Systemen eines metallherstellenden Betriebs

	Hydraulik mit Stell- scheibe	Hydraulikpumpen mit Frequenzumrichter	Direktantriebe
Zugeführte elektrische Leistung [kW]	148	133	75
Motorwirkungsgrad	0.9	0.9	
Pumpenwirkungsgrad	0.8	0.9	
Hydraulische Leistung [kW]	106	106	
Rohrleitungsverluste [%]	20	20	
Frequenzumrichterwirkungsgrad			0.95
Wirkungsgrad der Antriebseinheit	0.7	0.7	0.85
Mechanische Leistung [kW]	60	60	60
Kühlung [kW]	100	90	0
Einsparungen pro Jahr [MWh/a]		220	740

Tabelle 24: Vergleich der Leistung und Energie unterschiedlicher Antriebskonzepte

10.4. Energieeinsparpotential

Wird der elektrische Energieaufwand zwischen den hydraulischen und den elektromechanischen Systemen für die untersuchten Betriebe verglichen, kann das Einsparpotential analog den pneumatischen Systemen bestimmt werden.

	Einsparpotential [MWh/a]
Pharmabetrieb	740.0
Metallerzeugender Betrieb	86.5
TOTAL	826.5

Für die untersuchten Betriebe ergibt sich durch den Ersatz aller ölhydraulischen Anlagen durch elektromechanische Systeme demnach ein energetisches Einsparpotential von 826.5 MWh. Bei einem Kilowattstundenpreis von 10 Rp./kWh. sind das pro Jahr CHF 82'650.-.

10.5. Hochrechnung der Einsparpotentiale für die schweizerische Industrielandschaft

Ausgehend von einem Bezug von 225 GWh/a für hydraulische Antriebe in der Schweiz und dem angetroffenen Einsparpotential von 60% erhält man ein gesamtschweizerisches Energieeinsparpotential bei den Hydraulikaggregaten von 135 GWh/a.

11. Schlussfolgerungen

Anhand von energetischen Analysen der Druckluft- und Hydraulikanlagen in ausgewählten Industriebetrieben wurde das Einsparpotential an elektrischer Energie abgeschätzt, welches durch den Ersatz von pneumatischen und hydraulischen Antriebseinheiten durch Aktoren mit direkten Elektroantrieben entsteht. Aufgrund der Erkenntnisse aus [1] wurde die Abschätzung auf alle in der Schweiz installierten Druckluftanlagen ausgeweitet.

Die Überlegungen welche in dieser Studie dargelegt werden sind theoretischer Natur, das enorme Einsparpotential an elektrischer Energie ist jedoch nicht zu bestreiten. Welches Kosteneinsparpotential in den Betrieben vorhanden ist, wird durch eine Lebenskosten-Betrachtung belegt.

Eine Umsetzung im Rahmen von rigorosen Umbauaktionen der vorhandenen Druckluftanlagen kommt aufgrund eines kurzfristig orientierten Management- und Investitionsverhalten und träger, organisatorischer Überlegungen oft nicht in Frage.

Betrachtet man aber die anfallenden Betriebskostensparnisse, welche jährlich eingefahren werden können, so wird sich ein Unternehmer nicht lange besinnen und handeln. Je nach Substitution und Prozess können die anfallenden Investitionen innert Jahresfrist amortisiert werden. Im Mittel kann mit einem Amortisationszeitraum von 3 bis 4 Jahren gerechnet werden, was sich mit einer entsprechenden Ressourcen-Strategie gut rechtfertigen lässt.

Wichtig ist auch eine Sensibilisierung des Managements in den Industriebetrieben betreffend Vollkosten (Betriebskosten/Lebenskosten) von Druckluft- und Hydraulikanlagen und dem aufgezeigten Einsparungspotential im Fall eines Technologiewechsels zu rein elektromagnetische betriebenen Anlagen.

Durch den minimalen Einsatz oder den absoluten Verzicht auf Druckluft beim Engineering, Design und der Planung neuer Anlagen und Installationen kann ein kontinuierlicher Abbau der installierten Druckluft- und Hydraulikleistung angestrebt werden. Dazu wird von Konstrukteuren, Anlagen- und Maschinenbauern, Planern und Ingenieurbüros in einigen Industriebereichen ein gewisses Maß an Kreativität Voraussetzung sein.

12. Referenzen

- [1] R. Gloor: **Energieeinsparungen bei Druckluftanlagen in der Schweiz**, www.energie.ch – Programm Elektrizität, Projektnummer 33 564, 2000.
- [2] Joachim E. Albrecht: **Energetischer Vergleich pneumatischer, hydraulischer und elektromechanischer Antriebs- und Werkzeugsysteme**, Material zu Ravel, Dokumentnummer 724.397.12.56 D, 1993.
- [3] Dr. Hesse, Fa. NEUERO: Theoretische und praktische Grundlagen der pneumatischen Förderung, Vortrag anlässlich eines Seminars in Moskau.
- [4] Atlas Copco: **Energie sparend und umweltschonend**, Broschüre anlässlich 10 Jahre VSD-Technologie.
- [5] Bundesamt für Statistik: **Allgemeine Systematik der Wirtschaftszweige**, Publikationen NO-GA 2002.
- [6] iFD Institut für Fluidtechnik der Universität Dresden: **Experimentelle Ermittlung und Berechnung des Energienutzungsgrades hydraulischer Antriebe**, Forschungsprojekt.
- [7] BDT: **Steuern und Regeln im Maschinenbau**, Europa-Lehrmittel 1989.
- [8] Küttner: **Kolbenverdichter**, Springer-Verlag, 1991
- [9] Festo Didactic, <http://www.festo-didactic.com/didactic/>
- [10] KFM Regelungstechnik GmbH, **Stellventile**, <http://www.kfm-regelungstechnik.de>
- [11] Timmer, **Produktkatalog, 2004**
- [12] IAI, **RCP-RoboCylinder Produktkatalog, Katalog** Nr. 0405-D
- [13] K. Kreisel und E. Jochen: **Druckluft rationell erzeugen und nutzen**; Fraunhofer Institut Systemtechnik und Innovationsforschung für das Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg